



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du
Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Thème :

**Performances d'Isolateurs HT Pollués sous Tension
Alternative 50Hz et Distributions du Champ et du Potentiel
Electriques utilisant COMSOL**

Proposé et dirigé par:

Pr. Madjid TEGUAR

Etudié par :

Mohamed Oussama MEFTAH

Mourad RAHAL

- Promotion Juin 2011-

ملخص:

نقترح في هذا العمل، دراسة تصرف عوازل التوتر العالي نوع : 1512L و 175CTV الملوثة اصطناعيا تحت تيار متناوب 50 هرتز ، التجارب التي أجريناها، سمحت لنا بمتابعة تطور: توتر الإحاطة، تيار التسرب، الشحنة الكهربائية، الممانعة و المكثفة المكافئتان و الطاقة وذلك بتغيير عدة عوامل كهروهندسية مثل : التوتر المطبق، ناقلية الطبقة الملوثة وعدد العوازل المستعملة في السلسلة . باستعمال برنامج **COMSOL Mutliphysics** الذي يعتمد على طريقة العناصر المنتهية، قمنا بدراسة توزيع الكمون و الحقل الكهربائيين على طول سلسلة العوازل 175 CTV وذلك بتغيير العوامل المذكورة سابقا.

كلمات مفتاحية: تلوث، تيار التسرب، توتر الإحاطة ، شحنة كهربائية، عازل، ناقلية، ممانعة، مكثفة، محاكاة، كمون، حقل كهربائي.

Résumé:

Dans ce travail, nous étudions le comportement des isolateurs de haute tension types 1512L et 175 CTV artificiellement pollués sous tension alternative 50Hz. Les essais expérimentaux nous ont permis de suivre l'évolution de la tension de contournement, du courant de fuite, de la charge électrique, de l'impédance et la capacité du système équivalentes et de l'énergie du système en fonction de différents paramètres électro-géométriques, à savoir : la tension appliquée, la conductivité de la couche polluante et le nombre d'isolateurs dans une chaîne. En utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics 3.5, basé sur la méthode des éléments finis, nous nous sommes intéressés par la suite, à l'étude des répartitions du potentiel et du champ électriques, le long de la chaîne d'isolateurs 175 CTV, en fonction des paramètres susmentionnés.

Mots clés : pollution, courant de fuite, tension de contournement, charge électrique, isolateur, conductivité, impédance, capacité, simulation, potentiel, champ électrique.

Abstract:

In this work, we study the behavior of outdoor insulators types 1512L and 175 CTV which were polluted artificially under AC voltage and 50 Hz. The laboratory tests allowed us to follow the flashover voltage, the leakage current, the charge, the equivalent impedance and capacity and the energy with the variation of the different electro-geometrical parameters such as: the applied voltage, the pollution layer's conductivity and the number of insulators employed in each string.

Using COMSOL Mutliphysics 3.5 software, based on the finite elements method, we studied the repartition of the electric potential and field along the 175 CTV insulators, by keeping the same precedent parameters.

Key words: pollution, leakage current, flashover voltage, electric charge, insulator, conductivity, impedance, capacity, simulation, potential, electric field.

Remerciements

Nous rendons grâce à dieu de nous avoir donné le courage et la patience afin de mener ce travail à terme.

*Nous remercions particulièrement notre promoteur Monsieur **M. Tegar**, professeur à l'ENP, pour son dévouement exceptionnel, sa précieuse directive, et son suivi constant.*

*Nos sincères remerciements à Monsieur **A. Mekhaldi** et à Monsieur **A. Boubakeur**, professeurs à l'ENP pour leur aide et leurs conseils.*

Que les membres de jury, trouvent ici notre profonde gratitude pour l'honneur qu'elles nous font en acceptant de juger ce modeste travail.

*Monsieur **B.A.M'hamdi**, maitre de conférences à l'université de Djelfa, mérite également nos remerciements pour son aide et ces qualités humaines.*



Dédicaces

Chaleureusement je dédie ce modeste travail :

*A la lumière de ma vie, mes chers parents en
témoignage de leur amour et de leurs sacrifices sans
limites, je leur souhaite une bonne santé*

A mon frère Housseem

A mes sœurs

A toute ma famille

A mes amis

Mohamed Oussama



Dédicaces

Chaleureusement je dédie ce modeste travail :

*A mes parents qui ont tout donné pour me
permettre de réaliser mes rêves*

*A mon frère qui m'a toujours soutenu et qui a
toujours été présent*

A toute la famille RAHAL

A toute la famille AÏCHE

A Momo et à son équipe et à tous mes amis

Mourad

Introduction générale 1

Chapitre I : Isolateurs de haute tension et pollution

I.1	Introduction	4
I.2	Types d'isolateurs.....	4
I.2.1	Isolateurs rigides	4
I.2.2	Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne	5
I.2.3	Isolateur à long fût.....	5
I.2.4	Isolateur capôt et tige	6
I.2.4.1	Profil standard.....	7
I.2.4.2	Profil antibrouillard (forme A).....	8
I.2.4.3	Profil antibrouillard (forme B).....	8
I.2.4.4	Profil sphérique.....	8
I.2.4.5	Profil plat	9
I.3	Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs	9
I.3.1	Céramique	9
I.3.2	Verre.....	10
I.3.2.1	Le verre recuit	10
I.3.2.2	Le verre trempé	10
I.3.3	Matériaux synthétiques	10
I.4	Phénomène de pollution des isolateurs.....	10
I.5	Sources de pollution	11
I.5.1	Pollution naturelle	11
I.5.1.1	Pollution marine :.....	11
I.5.1.2	Pollution désertique	11
I.5.2	Pollution industrielle	12
I.5.3	Pollution mixte	12
I.6	Conséquences de la pollution	12
I.6.1	Arc non localisé.....	12
I.6.2	Arc fixe.....	12
I.6.3	Contournement des isolateurs pollués.....	12

I.7	Sévérité de pollution d'un site	14
I.7.1	Classification de la sévérité des couches polluantes	14
I.7.2	Méthodes de mesure de la sévérité d'un site	14
I.7.2.1	Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE).....	15
I.7.2.2	Conductance superficielle	15
I.7.2.3	Courant de fuite de la plus forte crête (I_{fc})	15
I.7.2.4	Comptage d'impulsions	16
I.7.2.5	Contraintes de contournement	16
I.7.2.6	Mesures optiques	16
I.8	Méthodes d'essais sous pollution	16
I.8.1	Essais sous pollution naturelle	17
I.8.2	Essais sous pollution artificielle	17
I.8.2.1	Méthode des couches solides	17
I.8.2.2	Méthode du brouillard salin	17
I.8.2.3	Méthode de la pollution liquide	18
I.9	Techniques de lutte contre la pollution :	18
I.9.1	Allongement de la ligne de fuite	18
I.9.2	Utilisation des isolateurs à profil plat	18
I.9.3	Graissage des isolateurs par une couche hydrophobe	19
I.9.4	Revêtement à base de silicone	19
I.9.5	Utilisation des isolateurs composites	19
I.9.6	Nettoyage sous et hors tension :	19
I.10	Conclusion	20

Chapitre II : Travaux antérieurs dans le domaine de la pollution des isolateurs et la simulation numérique

II.1	Introduction	21
II.2	Travaux sur la pollution des isolateurs	21
II.2.1	Influence de la forme de l'isolateur (Le Roy et Cie).....	21
II.2.2	Influence du diamètre	23
II.2.3	Travaux de Bologna, Britten, Mahatho et Reynders	26

II.2.4	Travaux de Meghnefi, Volat et Farzaneh.....	27
II.2.5	Travaux sur la pollution marine	28
II.2.6	Travaux sur la pollution désertique	28
II.2.7	Travaux de Yong Zhou et al.....	30
II.2.8	Travaux de Metwally et al.....	32
II.3	Travaux sur la distribution du champ et du potentiel électriques.....	34
II.3.1	Travaux expérimentaux.....	34
II.3.2	Travaux de simulation numérique.....	36
II.4	Conclusion	39

Chapitre III : Techniques expérimentales et résultats d'essais

III.1	Introduction.....	40
III.2	Dispositif expérimental.....	40
III.3	Objets d'essai	41
III.3.1	Isolateur 1512L	41
III.3.2	Isolateur 175 CTV	43
III.4	Préparation de l'isolateur avant chaque essai	44
III.5	Préparation des solutions polluantes.....	44
III.6	Méthode de pulvérisation.....	44
III.7	Circuits de mesure.....	45
III.7.1	Mesure de la tension de contournement.....	45
III.7.2	Mesure du courant de fuite et de la charge.....	45
III.8	Résultats des essais et discussions	45
III.8.1	Tension de contournement	45
III.8.2	Courant de fuite.....	50
III.8.3	Impédance électrique et capacité équivalentes.....	59
III.8.4	Charge électrique.....	61
III.8.5	Energie du système.....	70
III.9	Conclusion	72

Chapitre IV : Méthodes numériques de calcul du potentiel et du champ électriques

IV.1	Introduction.....	74
IV.2	Equations de Maxwell.....	74
IV.3	Conditions aux limites	76
IV.4	Conditions d'interfaces	77
IV.5	Méthode des Différences Finis (MDF)	80
IV.5.1	Principe	80
IV.5.2	Avantages de la MDF	82
IV.5.3	Inconvénients de la MDF	82
IV.6	Méthode des Eléments Finis (MEF)	82
IV.6.1	Principe	82
IV.6.2	Avantages de la MEF	84
IV.6.3	Inconvénients de la MEF.....	85
IV.7	Méthode de simulation de charges.....	85
IV.7.1	Principe	85
IV.7.2	Application à un problème présentant plusieurs diélectriques	86
IV.7.3	Avantages de la MSC	88
IV.7.4	Inconvénients de la MSC.....	88
IV.8	Méthode des éléments finis de frontière (MEFF)	88
IV.8.1	Introduction	88
IV.8.2	Formulation indirecte de la MEFF	89
IV.8.3	Résolution des équations intégrales.....	90
IV.8.4	Avantages de la MEFF	91
IV.8.5	Inconvénients de la MEFF.....	91
IV.9	Conclusion	92

Chapitre V : Simulation du champ et du potentiel électriques

V.1	Introduction	93
V.2	Simulation.....	93

Sommaire

V.3	Résultats de la simulation	95
V.3.1	Etude du potentiel.....	95
V.3.2	Distribution du champ électrique	102
V.4	Conclusion	108
Conclusion générale		110

Introduction générale

L'énergie électrique joue un rôle important dans le développement économique et industriel d'un pays. A l'heure de la libéralisation des marchés de l'énergie, il est devenu primordial d'assurer un bon acheminement de l'électricité jusqu'aux consommateurs, en assurant la continuité et la fiabilité du service. C'est pour cela que l'une des principales cibles, dans les travaux de recherche dans le domaine de l'énergie, est la diminution du nombre et de la durée des interruptions de l'alimentation en énergie électrique.

Les équipements de haute tension présents des les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique, sont supposés opérer de façon fiable, quelles que soient les conditions environnementales. En particulier, les isolateurs constituent un élément essentiel dans le bon fonctionnement des lignes. Ils ont un double rôle mécanique, en reliant les conducteurs sous tension, et électrique, en assurant l'isolement électrique entre les deux parties.

Ces isolateurs sont soumis à différentes contraintes environnementales, dont la plus importante est la pollution. Cette pollution peut avoir plusieurs origines : industrielle, marine, désertique et peut être mixte.

La pollution, à l'état sec, n'engendre pas une dégradation de la rigidité diélectrique. Cependant, en s'humidifiant, elle provoque la dissolution des sels et la formation d'une couche électrolytique. Cette dernière engendre la naissance d'un courant de fuite qui, par effet Joule, chauffe la couche de pollution qui sèche progressivement [1]. La répartition du potentiel entre électrodes est changée. Ainsi, une partie importante de la tension appliquée se trouve rapportée sur la bande sèche engendrant, si le champ local dépasse un certain seuil, un claquage diélectrique et l'établissement d'une décharge électrique ou d'arcs partiels. Dans certaines conditions, cette décharge peut s'allonger jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur.

Une connaissance approfondie de la distribution du potentiel et du champ électrique le long des isolateurs, recouverts de couches polluantes, permettrait de déterminer les valeurs critiques de potentiel et de champ électrique donnant naissance à ces arcs partiels.

La problématique reliée à une telle étude, se trouve dans la difficulté à déterminer, expérimentalement, de manière précise, la distribution du potentiel et de surcroît, celle du champ électrique le long des isolateurs pollués. En effet, ces mesures, qui ne peuvent être réalisées qu'en laboratoire, requièrent un appareillage lourd et sophistiqué, généralement coûteux.

Toutefois, il existe une alternative aux mesures expérimentales, consistant en l'utilisation d'outils numériques dans le but de déterminer les distributions du potentiel et du champ électriques le long des isolateurs pollués. Avec le développement croissant de l'informatique et de logiciels de calcul électromagnétique de plus en plus puissants, il est maintenant possible d'obtenir des résultats rapides et précis. Parmi les méthodes numériques disponibles et applicables aux calculs électromagnétiques, la Méthode des Éléments Finis. Ainsi, son utilisation, par le biais du logiciel commercial COMSOL Multiphysics 3.5, fut retenue pour réaliser les différentes simulations.

Notre travail est composé de deux parties essentielles. La première partie, expérimentale, consiste à étudier l'effet de la pollution artificielle sur le comportement des isolateurs capôt et tige de différents profils et gabarits type 1512L et le 175 CTV. La deuxième partie est dédiée à la détermination numérique des distributions du potentiel et du champ électriques le long d'une chaîne d'isolateurs de type 175 CTV. Nous étudions l'influence de quelques paramètres entrant en jeu dans de telles distributions. Ainsi, nous avons réparti notre travail en cinq chapitres distincts.

Le premier chapitre est consacré à la présentation des différents types d'isolateurs, ainsi qu'à la présentation des phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique. Nous exposons par la suite, certaines méthodes de mesures de la sévérité de pollution des sites, quelques méthodes d'essais sous pollution naturelle et artificielle, ainsi que différentes techniques de lutte contre la pollution.

Le second chapitre est consacré à une revue des principaux travaux antérieurs étudiant les phénomènes de contournement sur les isolateurs réels. Les travaux liés à la détermination du potentiel et du champ électrique par des méthodes numériques y sont également présentés.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats obtenus lors des essais effectués au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique. Deux types d'isolateurs ont été utilisés à savoir le 1512L et le 175 CTV. Pour un type d'isolateurs donné, les paramètres d'influence consistent en le niveau de tension appliquée, la conductivité de la pollution (solution saline à base de NaCl) et le nombre d'isolateurs utilisés. Les résultats d'essais concernent la tension de contournement, le courant de fuite et la charge électrique. Ces paramètres permettent la détermination de l'impédance et la capacité électriques équivalentes, ainsi que l'énergie électrique du système.

Dans le quatrième chapitre, nous faisons un rappel sur les équations de Maxwell et les équations qui en résultent. Puis, nous présenterons différentes méthodes de simulation numériques du potentiel et du champ électriques, en citant leurs avantages et leurs inconvénients.

Le cinquième chapitre est consacré à l'étude, via le logiciel commercial COMSOL Multiphysics, de la distribution du potentiel et du champ électriques le long d'une chaîne d'isolateurs 175 CTV en fonction du niveau de la tension appliquée, de la conductivité de la pollution, du nombre d'éléments dans la dite chaîne, et de la distance par rapport à l'axe de l'isolateur.

Nous terminons par une conclusion générale représentant une synthèse globale de notre travail.

Chapitre I

Isolateurs de haute tension et pollution

I.1 Introduction

L'isolateur de haute tension est utilisé pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces soumises à deux tensions différentes, son rôle est d'empêcher les courts circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution qui peuvent engendrer des pertes économiques voire des pertes humaines. L'isolateur peut être un matériau solide, liquide (huile de transformateur) ou gaz (SF_6) qui a une très grande résistance au passage du courant et donc, une conductivité pratiquement nulle.

Les isolateurs des lignes aériennes, objets de notre travail, ont deux fonctions principales. Ils permettent, d'une part, d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre. D'autre part, ils jouent le rôle de support mécanique qui consiste à soutenir ces mêmes lignes, et donc résister aux différentes contraintes mécaniques dues essentiellement au poids de la ligne.

I.2 Types d'isolateurs

On peut classer les isolateurs selon différents critères: le domaine d'utilisation (support ou traversée), matériaux utilisés, profils, etc.

I.2.1 Isolateurs rigides

Ils sont constitués d'un ou plusieurs isolateurs encastrés et scellés entre eux (Figure I.1) [2]. Ils sont reliés aux pylônes par une ferrure fixe. L'isolateur rigide est principalement soumis à des forces de flexion et de compression lorsqu'il est placé en position verticale. Il peut également être placé de manière horizontale, voire oblique. Cet isolateur est utilisé pour des lignes aériennes ne dépassant pas 60 kV [2].

Les isolateurs rigides normalisés en céramique sont constitués d'un fût massif. Ils ont remplacé les anciens isolateurs rigides en céramique formés de plusieurs cloches.

Tous les isolateurs rigides normalisés sont livrés avec une douille scellée de telle façon qu'ils puissent être vissés directement sur les ferrures correspondantes. Le scellement au plâtre, lors du montage de la ligne, opération délicate, est ainsi évité.

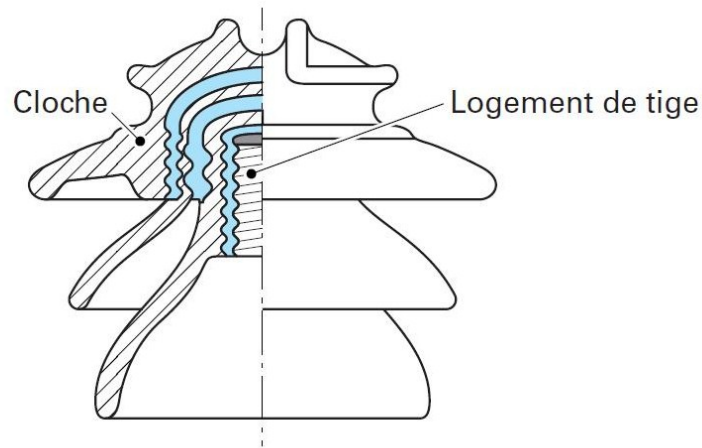


Figure I.1 : Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre

I.2.2 Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne

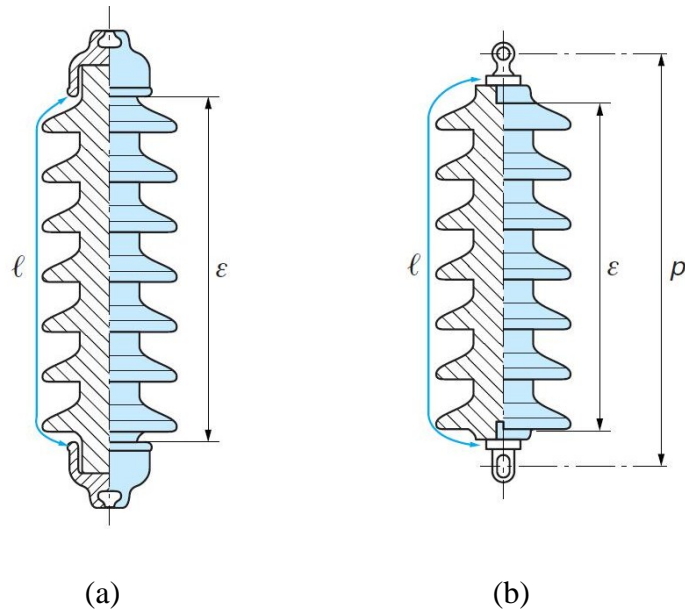
Ils sont constitués du matériau isolant ainsi que d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et qui permet de donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs [3, 4]. La chaîne d'isolateurs peut être montée sur le pylône en suspension, ou bien verticalement (chaîne d'alignement), ou encore d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage).

On peut distinguer deux types d'éléments de chaîne :

- L'isolateur capôt et tige.
- L'isolateur à long fût.

I.2.3 Isolateur à long fût

Il est constitué d'un bâton cylindrique plein; en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques; muni d'ailettes. A chaque extrémité, il y a une pièce métallique pour les liaisons [4]. Cette extrémité métallique peut se présenter sous deux formes distinctes, soit elle enveloppe les extrémités tronconiques sur le cylindre (Figure I.2.a), soit elle est en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet (Figure I.2.b) [2, 3, 5].



l : plus courte distance dans l'air, extérieure à l'isolateur ;

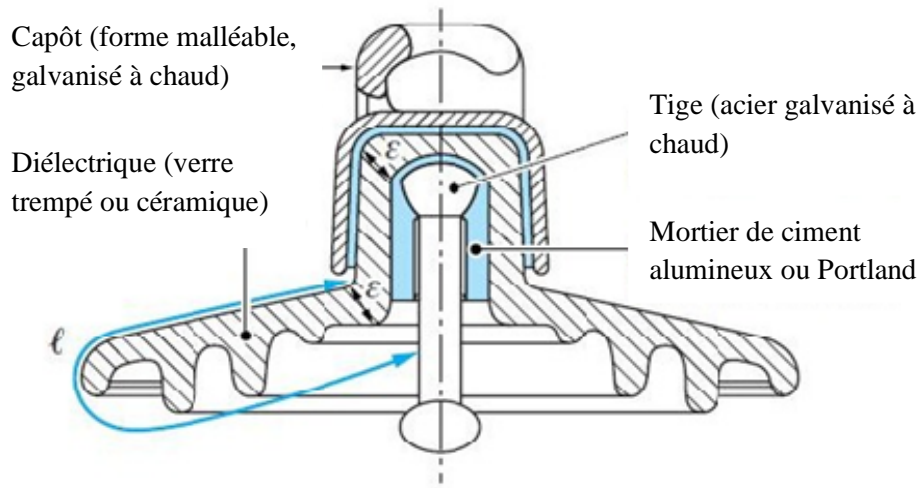
p : pas nominal ;

ε : longueur du canal de perforation ($\varepsilon \gg l/2$).

Figure I.2 : Isolateurs à long fût

I.2.4 Isolateur capôt et tige

L'isolateur capôt et tige est constitué d'un corps isolant qui porte à l'intérieur une tige en acier, où la tête conique de cette tige est scellée dans le matériau isolant (verre ou porcelaine). L'extrémité supérieure de l'isolateur porte un capôt scellé en fonte malléable. Ce dernier est troué de telle sorte qu'on peut faire entrer l'extrémité inférieure de la tige dans ce trou. Le scellement des éléments de chaîne capôt et tige se fait de cette façon en faisant pénétrer la partie inférieure de la tige de l'élément supérieur dans le capôt de l'élément inférieur, en utilisant du ciment (Figure I.3) [2].



l : Plus courte distance dans l'air entre le capôt et la tige :

ε : Longueur du canal de perforation, $\varepsilon \ll l/2$.

Figure I.3 : Vue en coupe d'un isolateur capôt et tige

Les caractéristiques des éléments d'isolateur de type capôt et tige sont régies par la norme CEI-60305. Cette norme est destinée aux isolateurs situés dans des régions non polluées et polluées. Cependant, pour des conditions extrêmes, on peut modifier certaines caractéristiques des isolateurs (ligne de fuite, forme, etc.), afin d'obtenir un meilleur fonctionnement.

I.2.4.1 Profil standard

La forme et les dimensions sont en accord avec la normalisation internationale (CEI 305 1978), à cause de leur planéité, les rainures internes bien espacées et la longueur de la ligne de fuite supérieure à la demande standard. Ce type est très utilisé dans les endroits à pollution moyenne (Figure I.4) [3].



Figure I.4 : Isolateur capôt et tige de profil standard.

I.2.4.2 Profil antibrouillard (forme A)

Son diamètre est plus grand que celui du profil standard. Il est muni de deux ou trois rainures à grande profondeur. Le profil et les grands espacements des rainures permettent un auto lavage par l'action de vent et de la pluie. Cette conception permet également un lavage manuel facile si c'est nécessaire (Figure I.5) [2, 3].

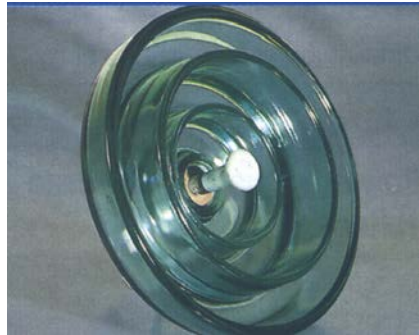


Figure I.5 : Isolateur capôt et tige de profil anti-brouillard (forme A)

I.2.4.3 Profil antibrouillard (forme B)

Dans cette conception, l'épaisseur de la rainure extérieure agit comme une barrière contre l'action du brouillard et de dépôt des sels minéraux sur la surface de l'isolateur, empêchant alors la formation d'un électrolyte conducteur sur la surface. Ce type d'isolateur est efficace dans les zones côtières (Figure I.6).



Figure I.6 : Isolateur capôt et tige de profil anti-brouillard (forme B)

I.2.4.4 Profil sphérique

Cette forme spécifique, avec absence de rainures, donne une longueur de fuite assez importante et permet un lavage manuel facile et efficace (Figure I.7).

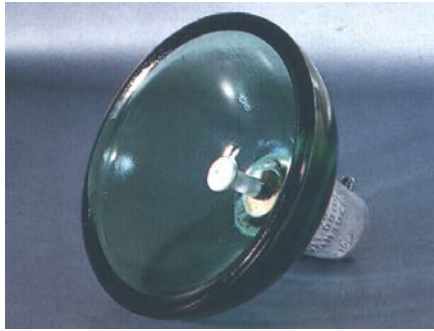


Figure I.7 : Isolateur capôt et tige de profil sphérique

I.2.4.5 Profil plat

L'élimination complète des rainures internes réduit l'accumulation des agents polluants sur la surface basse, grâce au courant d'air. Cette conception est particulièrement efficace dans les zones désertiques où l'auto lavage par la pluie est peu fréquent (Figure I.7).



Figure I.8 : Isolateur capôt et tige de profil plat

I.3 Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs

Bien qu'ils soient des matériaux fragiles, le verre, la céramique et la porcelaine sont les matériaux les plus utilisés dans la fabrication des isolateurs. La céramique est de plus en plus abandonnée à cause de deux inconvénients majeurs : le poids et la difficulté de détection des amorçages.

Ces dernières années, on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation des matériaux synthétiques dans les isolateurs [3, 4].

I.3.1 Céramique

Le développement et la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances. Dans des lieux où il y a des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence des isolateurs en céramique à grains très fins. Souvent, on trouve les céramiques

dans les postes: isolateurs supports, couvertures isolantes des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance, ... [2, 3].

I.3.2 Verre

En Algérie, c'est le matériau employé dans la fabrication des isolateurs des lignes moyenne et haute tensions. Le verre a pour avantage d'avoir un faible coût, et une aisance pour l'observation des défauts [4, 5]. On distingue deux types d'isolateurs en verre :

I.3.2.1 Le verre recuit

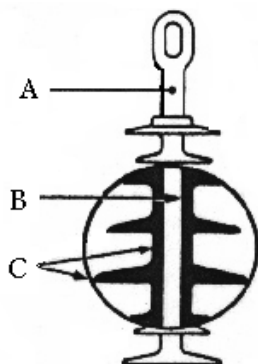
Utilisé pour la fabrication des isolateurs rigides. Cependant, il ne résiste pas aux variations brusques de températures, tout comme, il ne supporte pas les fortes contraintes mécaniques.

I.3.2.2 Le verre trempé

Il présente une contrainte mécanique en traction environ 5 à 6 fois plus grande que celle du verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100°C.

I.3.3 Matériaux synthétiques

Ces isolateurs, dits composites, sont constitués d'une âme réalisée en fibre de verre imprégnée de résine, donnant à l'isolateur sa tenue mécanique, et d'un revêtement à ailettes de type élastomère (Figure I.9). Ils ont pour avantage d'être très légers et d'avoir une grande résistance mécanique [2, 4, 5].



A : Pièces d'accrochage métallique.

B : noyau en fibre de verre-résine.

C : Revêtement à ailettes en matériaux synthétiques.

Figure I.9 : Isolateur composite

I.4 Phénomène de pollution des isolateurs

Les isolateurs de haute tension sont exposés à diverses formes et degrés de contraintes. Parmi celles-ci, la pollution atmosphérique est considérée comme étant le facteur majeur à l'origine des défauts enregistrés sur les lignes aériennes. La performance électrique des isolateurs de

lignes de transport d'énergie électrique est dégradée par la présence de la pollution à leur surface. Cette pollution provoque une diminution considérable de la tension de tenue des isolateurs en abaissant leur résistivité superficielle. Ces couches de pollution se déposent sur les isolateurs de façon cumulative. Dans des conditions de forte humidité (brouillard, condensation matinale, pluie), il se forme un électrolyte conducteur et des courants de fuite s'établissent à la surface des isolateurs. À partir d'une certaine intensité de ces courants, la couche conductrice s'assèche dans les zones à forte densité de courant. Il en résulte la formation de petits arcs et une modification de la répartition du potentiel et du champ électriques. Dans certaines conditions, ces petits arcs évoluent jusqu'au contournement complet de l'isolation.

I.5 Sources de pollution

Nous distinguons trois sortes de pollutions : la pollution naturelle, industrielle et mixte.

I.5.1 Pollution naturelle

La pollution naturelle provient de sels marins dans des régions côtières, de poussières du sol (notamment lors de chantiers importants) et de sables véhiculés par le vent en régions désertiques [6].

I.5.1.1 Pollution marine :

Les lignes de haute tension qui passent près de la mer dans les zones côtières, sont exposées au vent marin. Ce dernier porte des embruns causant la formation d'une couche polluante de sel sur les surfaces des isolateurs. Cette couche peut devenir conductrice lorsqu'elle est humidifiée ou mouillée. Ce qui conduit à la circulation d'un courant de fuite et par suite, la génération d'arcs électriques ou même, parfois, la génération d'un contournement [2, 3].

I.5.1.2 Pollution désertique

Parmi les phénomènes qui caractérisent la nature désertique, les vents de sable. Malheureusement, après ces vents, des dépôts de sable se déposent sur les surfaces des isolateurs. Lorsque ces dépôts s'humidifient, ils deviennent plus ou moins conducteurs à cause de l'existence de sels dans le sable. Un courant de fuite apparaît brusquement accompagné d'arcs partiels, dont la propagation à la surface de l'isolateur peut aussi conduire à un contournement total de l'isolateur [3, 7].

I.5.2 Pollution industrielle

Le problème de la pollution industrielle se présente pour les lignes qui passent près des zones industrielles (les fumées des usines, raffineries, cimenteries, minerais, ...), près des grandes villes (les gaz d'échappement des véhicules) ou près des terrains agricoles (les engrais utilisés en agriculture) [6].

I.5.3 Pollution mixte

Ce type de pollution est le plus dangereux. Cette pollution est la résultante de l'existence de différents types de pollution dans la même zone ; cas des isolateurs installés dans les zones industrielles situées près de la mer.

I.6 Conséquences de la pollution

Les couches polluantes qui s'accumulent à la surface des isolateurs engendrent une conductivité électrique superficielle. Celle-ci modifie la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite. La tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante, ce qui entraîne l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite. Trois types d'arcs peuvent se présenter.

I.6.1 Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement puis se réamorçe à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition de courants de fuites entraînant une petite perte d'énergie, généralement supportable par le réseau de distribution [8].

I.6.2 Arc fixe

L'arc électrique se fixe sur la surface de l'isolateur, soit en s'y maintenant (courant continu) soit, en se réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner par effet thermique, une dégradation du support isolant de l'élément défaillant [9, 10].

I.6.3 Contournement des isolateurs pollués

Généralement, les principaux phénomènes conduisant au contournement d'un isolateur pollué, soumis à la tension de service, comprenant la formation d'une couche électrolytique conductrice par humidification du dépôt de pollution sur la surface de l'isolateur, sont l'apparition d'un courant de fuite accompagné de la formation d'une bande sèche et d'arcs partiels, et la propagation de l'arc, qui peut couvrir tout l'isolateur. Le contournement des isolateurs sous pollution peut être décomposé en quatre étapes distinctes.

Etape 1: Dépôt de la pollution

Les particules du dépôt sont apportées par le vent et se concentrent entre les nervures ou autour du capôt. Les facteurs d'accumulation sont les suivants [10]:

- La nature, le poids et la taille des particules polluantes.
- La distance de l'isolateur par rapport à la source de pollution et par rapport au sol d'où peuvent provenir des poussières.
- La vitesse du vent.
- L'orientation de la chaîne.
- La forme de l'isolateur et son aptitude à l'auto nettoyage par les fortes pluies et vents.

Etape 2: Humidification de la pollution

Le brouillard et la pluie fine humidifient la couche polluante, engendrant la dissolution des sels contenus dans le dépôt et créant ainsi un électrolyte conducteur sur la surface de l'isolateur. Un courant de fuite prend alors naissance.

Pendant le cycle d'humidification, le courant de fuite augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale. Ce courant peut diminuer s'il y a assèchement. Le niveau du courant de fuite dépend du temps, de la nature ainsi que de la quantité des sels.

Etape 3: Développement des zones sèches et apparition d'arcs

Par effet joule, la température s'élève, l'eau s'évapore et le dépôt devient moins conducteur. Le courant de fuite est alors réduit en amplitude, par la présence d'une bande sèche. La répartition du potentiel sur l'isolateur est modifiée par cette bande sèche ; car la plus grande portion du potentiel électrique se trouve reportée à ses bornes. Si, cette bande sèche est insuffisante pour supporter le potentiel correspondant, un arc est créé à ses bornes [10].

Etape 4: Comportement des arcs

La résistance du dépôt humidifié, non court-circuitée par l'arc, limite le courant et la longueur de l'arc. Si, le courant est trop faible, l'arc s'éteindra, la bande sèche s'humidifiera à nouveau et le mécanisme se répètera encore. Tant que le courant de fuite n'excède pas "le courant critique" correspondant à "une longueur critique" de l'arc, cette situation reste stable. Dans le cas contraire, le contournement de l'isolateur peut survenir [8].

I.7 Sévérité de pollution d'un site

Afin de dimensionner convenablement les isolateurs susceptibles d'assurer un service sans défaillance dans un site pollué, il est nécessaire de caractériser la sévérité de pollution de ce site. La mesure de la sévérité est généralement basée sur la détermination expérimentale de la conductance superficielle de la couche polluante ou la détermination au laboratoire du courant de fuite d'un isolateur pollué artificiellement.

I.7.1 Classification de la sévérité des couches polluantes

Pour définir l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la salinité et les niveaux de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été proposées [11].

➤ **Classe 1 :**

Cette classe correspond à une pollution faible. Cette pollution est généralement naturelle (sauf marine) ou légèrement industrielle. La salinité équivalente maximale retenue pour cette classe correspond à une pulvérisation d'une solution de chlorure de sodium à 2.5 g/l de concentration.

➤ **Classe 2 :**

La classe 2 correspond à une pollution moyenne. En général, cette pollution est naturelle (sauf marine) ou faiblement industrielle. En classe 2 la salinité équivalente maximale retenue est de 10 g/l.

➤ **Classe 3 :**

Cette classe correspond à des zones très localisées où l'on trouve simultanément une forte pollution marine et industrielle. La salinité équivalente maximale concernant cette classe est de 80 g/l.

➤ **Classe 4 :**

La classe 4 correspond aux zones où le niveau de pollution est exceptionnel. La pollution est éventuellement naturelle, industrielle ou mixte. La salinité équivalente maximale, pour la classe 4, est de 160 g/l.

I.7.2 Méthodes de mesure de la sévérité d'un site

La mesure de la sévérité de pollution peut être effectuée selon plusieurs méthodes, dont les principales sont :

I.7.2.1 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)

La DDSE est le dépôt équivalent exprimé en mg de sel par cm^3 de la surface d'un isolateur, qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel, lorsqu'il est dissous dans la même quantité d'eau [12].

Des échantillons de pollution sont prélevés à la surface d'isolateurs ou d'autres collecteurs. Le dépôt est récupéré par lavage, en utilisant un matériau absorbant (coton, mouchoir en papier,...) et de l'eau distillée. A partir de la conductivité de la solution obtenue, de la surface utilisée de l'isolateur, du volume d'eau et de la température, on peut déterminer la DDSE équivalente.

Ainsi, les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante pour obtenir les niveaux maxima entre les périodes de lavage naturel. Cette méthode permet d'établir une relation avec les méthodes d'essais sous pollution artificielle, ce qui est un avantage à prendre en considération. Elle présente, en outre, certains inconvénients, tels que les fréquences de prélèvements, les fluctuations de l'humidité et l'amorçage des arcs électriques qui ne sont pas pris en compte.

I.7.2.2 Conductance superficielle

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance σ par un facteur de forme de l'isolateur. Généralement, la tension est appliquée aux électrodes terminales, ce qui fournit la conductivité superficielle globale de l'isolateur [12, 13].

Ainsi, la mesure de la conductance superficielle est une méthode satisfaisante pour évaluer la sévérité de la pollution d'un site. Elle peut être représentative d'un type de site étudié, mais en général, elle présente des résultats dispersés.

I.7.2.3 Courant de fuite de la plus forte crête (I_{fc})

I_{fc} est la plus forte crête du courant de fuite enregistrée pendant une période donnée, sur un échantillon ou un isolateur réel, continuellement soumis à sa tension de service. Ces mesures doivent être effectuées pendant une période relativement longue et donc, à coût relativement élevé [12, 13].

Cette méthode est simple et tient compte de l'effet combiné des conditions atmosphériques et de la tension sur la couche polluante ; mais le coût relativement élevé de l'équipement de mesure contrebalance les avantages de cette méthode.

I.7.2.4 Comptage d'impulsions

Il consiste à enregistrer, à l'aide d'un dispositif approprié, pendant une période donnée, le nombre d'impulsions du courant de fuite, dépassant une certaine amplitude, pour un isolateur soumis à sa tension de service. L'existence d'impulsions précède généralement la phase finale de contournement sous pollution. La fréquence et l'amplitude de ces impulsions croissent lorsqu'on s'approche du contournement [12, 13].

Cette méthode se prête mieux à la détermination des longueurs d'isolateurs dans le cadre de l'extension ou du réisolement de réseaux existants. Cependant, elle ne fournit pas une mesure absolue de la performance des isolateurs et exige une aptitude au contrôle permanent.

I.7.2.5 Contraintes de contournement

La contrainte de contournement d'un isolateur est la tension de contournement divisée par la longueur totale de l'isolateur. La mesure de la contrainte de contournement donne toutes les informations nécessaires au calcul de la longueur de l'isolateur, qui donnera une fiabilité assez importante ou un taux de défaillance acceptable [12, 13]

Sur site, la contrainte de contournement peut être mesurée de différentes façons :

- Installation de chaînes d'isolateurs de même type, mais de différentes longueurs, et soumises à une tension constante. On estime les probabilités de contournement à partir des proportions d'amorçage enregistrées.
- Une autre méthode consiste à disposer des fusibles sur chaque chaîne, afin que la chaîne accroisse sa longueur effective jusqu'à atteindre le niveau de tenue en tension.

I.7.2.6 Mesures optiques

Le but des mesures optiques est d'évaluer l'épaisseur de la couche de pollution déposée à la surface de l'isolateur. Un dispositif à rayons lasers permet à partir des rayons réfléchis (amplitude, décalage de phase, ...), de calculer la constante diélectrique et l'épaisseur de la couche de pollution. La mesure de la sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche [12].

I.8 Méthodes d'essais sous pollution

Afin de comparer les performances de divers types d'isolateurs et de sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution, il est nécessaire de les soumettre à des essais. Pour effectuer ces essais, on distingue deux principales méthodes d'essais :

- Essais sous pollution naturelle sur site (in situ).
- Essais sous pollution artificielle.

I.8.1 Essais sous pollution naturelle

Ces essais consistent à installer dans différents sites pollués, des stations dans lesquelles on suit le comportement d'un certain nombre de chaînes d'isolateurs de longueurs ou de profils différents. Comme la pollution naturelle est un phénomène à évolution lente, l'essai sous pollution naturelle peut prendre jusqu'à deux ou trois ans. La qualité d'isolement des isolateurs placés sous la même tension est déterminée en fonction de temps au contournement. Ces essais ont l'avantage de tenir compte de l'effet de toutes les contraintes, dans toutes leurs complexités, sur un site donné [12]. A leur désavantage, ces essais nécessitent plusieurs années d'études pour pouvoir étudier les performances des isolateurs.

I.8.2 Essais sous pollution artificielle

Ils consistent à reproduire en laboratoire les conditions de la pollution naturelle. Ils sont aujourd'hui largement utilisés et ont l'avantage d'être rapides. Les méthodes d'essais qui demeurent actuellement normalisées sont les méthodes de la couche solide, la méthode du brouillard salin et la méthode de la pollution liquide.

I.8.2.1 Méthode des couches solides

Dans cette méthode la surface isolante est recouverte par pulvérisation, par trempage ou au pinceau, d'une couche de pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte. La conductivité de cette suspension est réglée par addition d'une certaine quantité de chlorure de sodium. Les isolateurs sont alors séchés afin que la couche polluante se stabilise.

Si, l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), le paramètre de sévérité est défini par la densité de dépôt de sel en mg/cm^2 . Si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité se définit mieux par la conductivité de la couche polluante [14].

Dans certains cas, la couche solide est constituée d'une peinture semi-conductrice qui garde après séchage une conductivité constante [5].

I.8.2.2 Méthode du brouillard salin

La surface isolante est alimentée par une tension de service (maintenue constante durant tous les essais), et soumise à un brouillard salin. La solution saline utilisée dans la méthode du brouillard salin représente assez bien la pollution marine contenant un peu de matière

insoluble. Elle est également valable pour représenter de nombreux dépôts de pollution industrielle ayant une couche de pollution relativement mince [11].

Le degré de salinité exprimé en kg de sel par m³ de solution, définit le paramètre de sévérité. Les valeurs de salinité appliquées en référence aux conditions de pollution sont choisies selon une progression allant de 2,5 à 160 kg/m³.

I.8.2.3 Méthode de la pollution liquide

Cette méthode s'apparente à la méthode du brouillard propre dans la mesure où un mélange liquide est appliqué sur l'isolateur avant l'essai. Cependant, dans ce cas, la pollution n'est pas séchée avant l'essai. Elle est constituée d'eau, de craie et de méthylcellulose ou de kaolin. Comme pour la méthode de la couche solide la conductivité est ajustée par addition de chlorure de sodium.

Après quelques minutes d'égouttage, la tension d'essai est appliquée à l'isolateur sans humidification supplémentaire.

I.9 Techniques de lutte contre la pollution

Un dimensionnement initial peut s'avérer insuffisant s'il y a de nouvelles sources de pollution (travaux routiers, implantation de nouvelles usines, ...) [15]. Afin de prévenir les incidents survenant sur les lignes en service, différentes techniques de lutte contre la pollution des isolateurs existent. Parmi ces techniques, on peut citer les suivantes :

I.9.1 Allongement de la ligne de fuite

Cette technique permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux méthodes sont utilisées :

- Le changement de type d'isolateurs (afin d'allonger la ligne de fuite) : c'est une méthode très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- L'utilisation de prolongateurs de lignes de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [16].

I.9.2 Utilisation des isolateurs à profil plat

L'utilisation d'isolateurs plats entraîne la diminution de la ligne de fuite des isolateurs. Cependant, ces derniers, sans nervures, ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels, et ils s'auto-nettoient facilement en présence de vent. Ces isolateurs sont principalement utilisés en région désertique [17].

I.9.3 Graissage des isolateurs par une couche hydrophobe

Grâce à ses propriétés hydrophobes, le graissage protège temporairement les isolateurs. La longévité du graissage est comprise entre 1 et 4 ans. Elle dépend essentiellement de l'environnement (pollution, conditions climatiques, ...) ainsi que de la qualité intrinsèque du produit. Cette technique est largement répandue dans le monde. Cependant, l'opération de nettoyage puis de graissage est pénible, longue et coûteuse. Elle nécessite également une interruption de service [18].

I.9.4 Revêtement à base de silicone

Cette technique consiste à appliquer, par pulvérisation ou par pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Comme pour la technique de graissage, grâce à ses propriétés hydrophobes, ce revêtement protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre, sa longévité est nettement supérieure à celle du graissage.

I.9.5 Utilisation des isolateurs composites

Ces isolateurs présentent l'avantage d'être d'une grande légèreté, d'une haute résistance aux contraintes mécaniques et d'avoir de bonnes propriétés hydrophobes. Ils peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères. Cependant, ces isolateurs, revêtus d'un polymère, voient leurs caractéristiques changer au cours du temps. Ils vieillissent sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service [18].

I.9.6 Nettoyage sous et hors tension

Le nettoyage manuel (essuyage à sec de l'isolateur) ou le lavage hors tension peuvent être utilisés de façon périodique, en particulier dans les postes. Comme ces méthodes sont utilisées hors tension, cela entraîne nécessairement des interruptions de service parfois assez longues. Afin d'éviter les coupures, le lavage sous tension est utilisé. Ce type de lavage permet de garder l'isolateur propre. Il est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans ces cas, il est effectué dans des conditions strictes concernant la qualité de l'eau de lavage, le processus de lavage ainsi que les distances de sécurité à respecter, afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage [19].

Le nettoyage des isolateurs à l'aide d'un abrasif pulvérisé sous pression est une technique utilisée le plus souvent en Amérique du Nord. Cette technique permet le nettoyage des isolateurs recouverts de couches de pollution très adhérentes tel le ciment. Cette technique peut également être utilisée pour dégraisser les isolateurs.

I.10 Conclusion

Les isolateurs entrent pour un pourcentage de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne ou haute tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépend la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service [20]. Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluants le moins élevé, c'est-à-dire les isolateurs qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.

La pollution des isolateurs est ainsi un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension de transport d'énergie électrique. Pour mieux dimensionner les chaînes d'isolateurs, il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites et les différents paramètres contribuant à la dégradation de l'état de surface des isolateurs (la pluviométrie, l'humidité, la température, le vent, ...).

Chapitre II

Travaux antérieurs dans le domaine de la pollution des isolateurs et la simulation numérique

II.1 Introduction

Depuis les dernières décennies, l'intérêt croissant vis-à-vis des phénomènes de contournement des isolateurs sous diverses conditions atmosphériques, a donné lieu à un nombre exhaustif d'études qui ont été publiées à travers le monde. Dans le but de donner plus de détails sur le phénomène étudié, une revue de littérature est présentée. Il s'agit de présenter les principaux travaux sur l'étude du phénomène de contournement et du courant de fuite sur des isolateurs réels sous différentes conditions de pollution.

Nous présentons également quelques travaux relatifs à la détermination expérimentale et numérique du potentiel et du champ électriques le long des isolateurs pollués.

II.2 Travaux sur la pollution des isolateurs

II.2.1 Influence de la forme de l'isolateur (Le Roy et Cie [21])

La longueur de fuite est un paramètre important qui influe sur la tenue diélectrique des isolateurs. Pour améliorer la performance d'un isolateur, on pourrait être tenté d'augmenter la longueur de fuite. En effet, plusieurs formes d'isolateurs sont utilisées.

Un isolateur dont le profil est simple (Figure II.1 a) possède une ligne de fuite plus petite que celle d'un isolateur comportant de nombreuses nervures comme les isolateurs antipollution (Figure II.1 b), lorsqu'ils sont identiquement pollués. En présence d'une pollution humide sur la surface de l'isolateur, des arcs locaux peuvent se développer sous certaines conditions. Si, les arcs locaux restent sur la surface isolante, la ligne de fuite est complètement utilisée (Figure II.1 a). Par contre, si les arcs adoptent un trajet plus court dans l'air, une partie de la ligne de fuite n'est plus utilisée. On admet que dans ce cas, la tension de contournement est inférieure à celle escomptée. Il est presque impossible de prédire l'amorçage des arcs dans l'air le long de la ligne de fuite, mais il a été observé qu'au delà d'une distance critique un claquage se produit [21]. D'autre part, on peut admettre que si la couche polluante est très conductrice, l'arc adopte un trajet préférentiel de la ligne de fuite. En revanche, une faible conductivité de la couche polluante favorise le claquage dans l'air entre les jupes.

Un facteur empirique appelé facteur de profil, FP , présenté sur la figure (II.1, a), a été introduit. Il représente le rapport entre la ligne de fuite simplifiée ($2P + S$) et celle réelle (LS) pour un pas de l'isolateur, (P) étant la profondeur horizontale maximale des ailettes et (S) la distance entre deux ailettes.

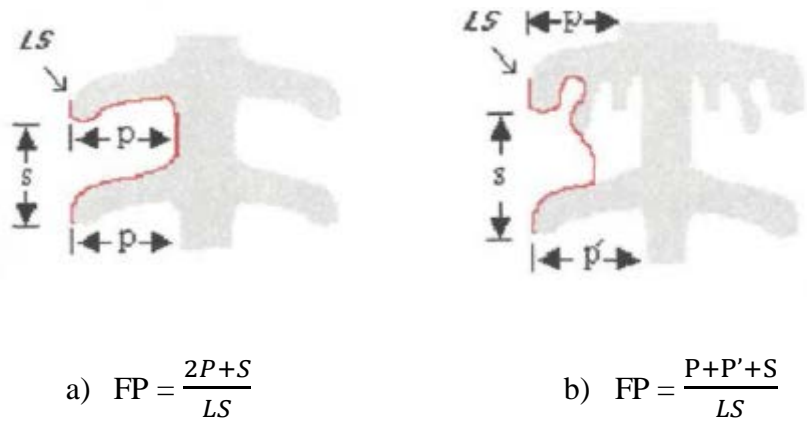


Figure II.1 : Définition du facteur de profil

Les expériences sur les isolateurs contaminés ont montré que, pour un niveau de pollution donné, la tension de contournement des isolateurs est d'autant plus faible que le facteur de profil est plus petit jusqu'à une valeur donnée de salinité (Figure II.2).

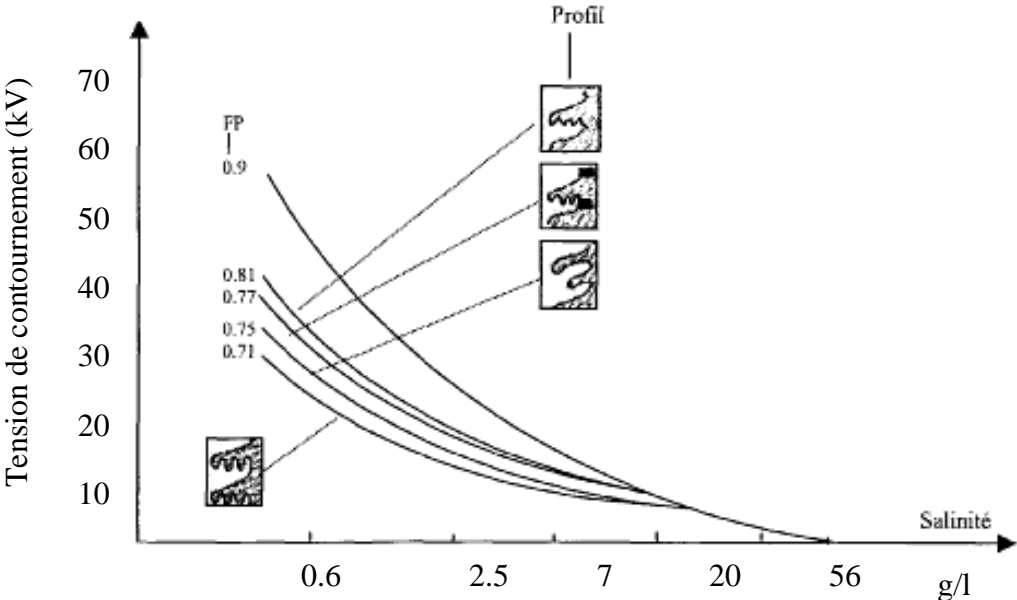


Figure II.2 : Influence du profil sur la tension de tenue des isolateurs pollués

II.2.2 Influence du diamètre

➤ Travaux de Le Roy et Cie [21]

Par définition, le diamètre moyen ϕ d'un isolateur réel correspond au diamètre d'un isolateur qui serait cylindrique et ayant la même ligne de fuite, L , et la même résistance lorsqu'il est recouvert de la même couche polluante qui a pour épaisseur e , (Figure II.3).

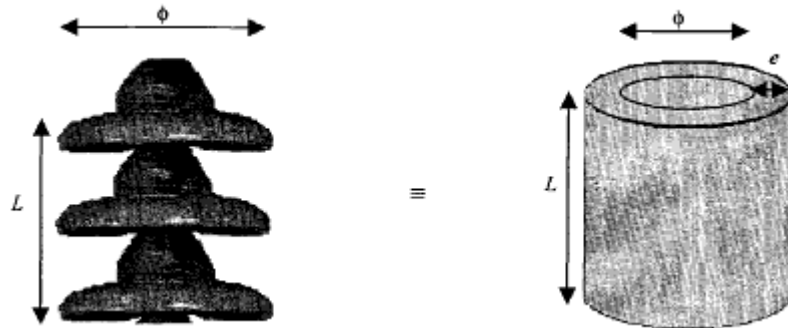


Figure II.3 : Approche d'un isolateur réel par un modèle cylindrique

En effet, la longueur d'un cylindre est donnée par :

$$L = \frac{S}{\pi\phi}$$

où S est la surface latérale du cylindre et ϕ est le diamètre. Par conséquent, si on intègre ϕ le long du profil de l'isolateur, on aura une approximation de son facteur de forme :

$$f = \int_0^L \frac{dS}{\pi\phi}$$

où ds est l'abscisse curviligne d'un point de l'isolateur mesuré le long de son profil.

Si, on assimile la couche polluante à un film régulier d'épaisseur e et de résistivité volumique ρ , la résistance de l'isolateur sera :

$$R = \int_0^L \frac{dS}{\pi\phi e} = \frac{\rho}{e} f$$

où f est le facteur de forme de l'isolateur.

D'autre part, la résistance du cylindre équivalent est :

$$R = \rho \frac{L}{\pi\phi e}$$

En conclusion, en assimilant l'isolateur réel à un isolateur cylindrique (Figure II.3) ayant une même ligne de fuite L et une même couche polluante, le diamètre moyen s'écrit [21] :

$$\phi = \frac{Lf}{\pi\phi e}$$

Pour les isolateurs de gros diamètre, on peut résumer le diamètre moyen comme suit :

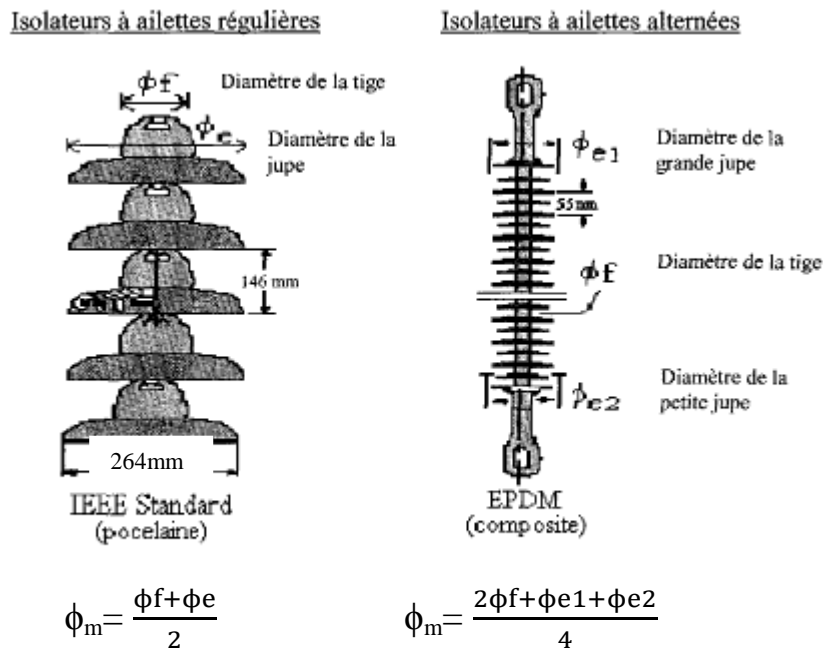


Figure II.4 : Diamètre moyen des isolateurs IEEE et EPDM

Il a été démontré que, pour une certaine densité de contamination, la tension critique de contournement diminue au fur et à mesure que le diamètre augmente et ce, jusqu'à une certaine valeur où la tension de contournement cesse de diminuer [21]. Ce phénomène s'explique par le fait qu'un large diamètre ϕ signifie une plus grande exposition de la surface à la pollution, diminuant ainsi la résistance et réduisant, par conséquent, la tension de contournement. Par contre, une augmentation relative du diamètre peut causer un supplément d'arcs locaux provoquant une baisse de tension aux bornes de l'électrode. Cette baisse de tension compense partiellement la baisse de la tension de contournement. De plus, l'augmentation du diamètre peut impliquer l'augmentation de la distance de fuite qui atténue la diminution de la tension de contournement. La figure (II.5) exprime les résultats d'essais par le rapport entre la tension de contournement mesurée (V_c) et la tension de contournement moyenne des isolateurs de petit diamètre (V_c^*).

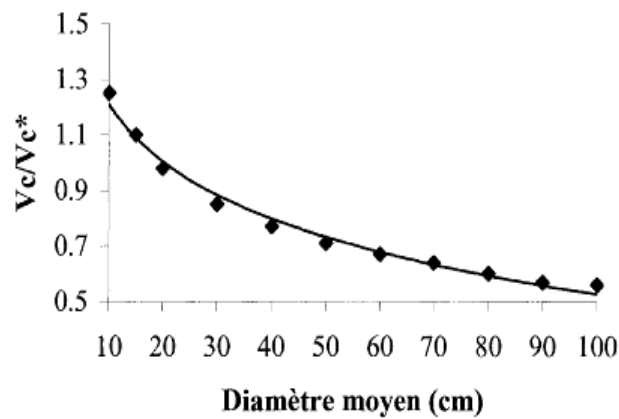


Figure II.5 : Performance des isolateurs pollués en fonction du diamètre moyen

➤ **Travaux de Matsuoka et al., [22]**

Les expériences de Matsuoka et al [22], ont montré que la tension de tenue diminue au fur et à mesure que le diamètre augmente (Figure II.6). La variation du diamètre affecte aussi la densité du dépôt de contamination sur l'isolateur : plus le diamètre augmente, plus la densité du dépôt contaminant diminue (Figure II.7).

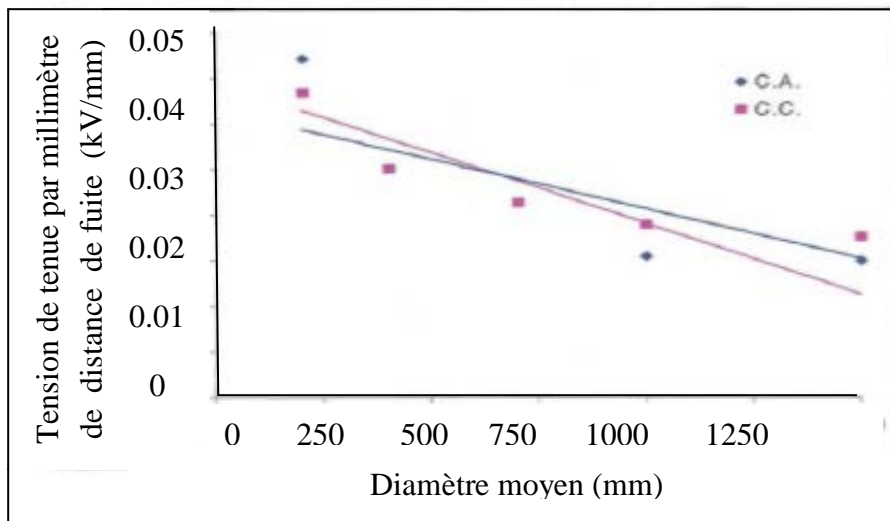


Figure II.6 : Tension de tenue par millimètre de distance de fuite en fonction du diamètre (C.A : courant alternatif et C.C : courant continu)

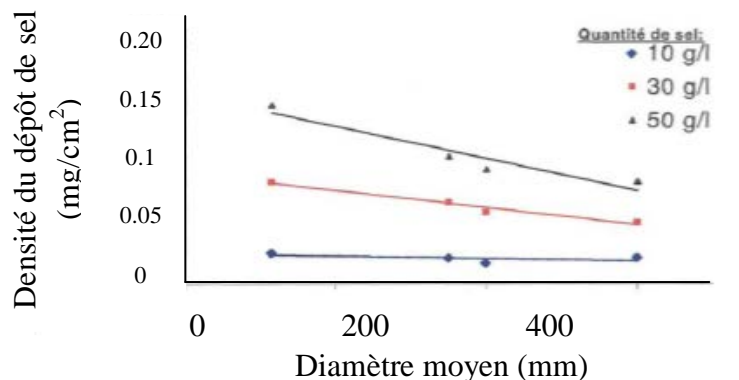


Figure II.7 : Densité de dépôt de sel en fonction du diamètre moyen

II.2.3 Travaux de Bologna, Britten, Mahatho et Reynders [23]

Bologna et al. ont effectué des essais sur des isolateurs légèrement pollués au laboratoire et en service. Leurs études ont montré que la majorité des contournements ont lieu entre 20h00 et 06h00. Ce mécanisme doit être lié à la combinaison du léger mouillage dû à la condensation et la légère couche de pollution, probablement non uniforme, déposée sur l'isolateur. Dans ces conditions, un courant de fuite s'établit sur la surface de l'isolant, ce qui provoque un contournement. Les investigations se sont basées sur des tests réalisés sur des isolateurs de 400 kV en service et au laboratoire, en mesurant l'amplitude du courant de fuite et en analysant sa forme. Les isolateurs des lignes de 400 kV comportaient 23 disques en verre. Les données ont été relevées en continu (sans interruption) durant une période de 8 mois. Une analyse des données a montré la relation entre les conditions environnementales (généralement l'humidité) et l'amplitude du courant de fuite. Il a été remarqué, effectivement, que le courant de fuite est fonction de la sévérité de la pollution sur la surface des isolateurs caractérisée par l'ESDD (Equivalent Salt Deposit Density) utilisée pour l'évaluation de la sévérité de la pollution.

Pour les tests au laboratoire, les isolateurs ont été pollués artificiellement. La sévérité de la pollution utilisée durant l'expérimentation est de 5 g de sel pour un litre d'eau. Celle-ci est considérée comme une pollution légère [24]. La tension est la même qu'en service soit 15,33 kV/mm. Les paramètres de surveillance sont le courant de fuite (amplitude et forme d'onde) et la tension.

Dans le cas d'un mouillage uniforme, il a été remarqué, une minute approximativement après la mise sous tension, l'apparition de micro-étincelles sur les éléments. Le plus loin du bout de la chaîne (côté terre) a marqué le plus d'activité.

Le courant de fuite a été trouvé en phase avec la tension, ce qui correspond à la présence d'une couche de pollution répartie uniformément sur la surface (Figure II.8).

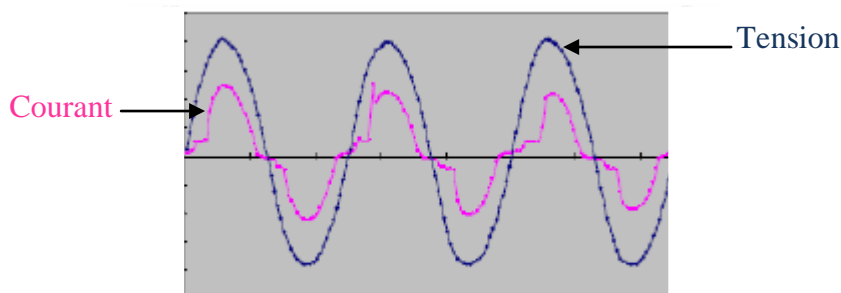


Figure II.8 : Tension et courant de fuite relevés cas d'isolateur uniformément pollué

Dans le cas d'une humidification non uniforme, le côté bas de chaque élément de l'isolateur est mouillé, le haut est gardé propre. Des micro-étincelles sont remarquées sur les deux côtés de l'élément (bas et haut), les éléments loin de la borne HT marquant le plus d'activité en termes d'apparition d'étincelles.

Ainsi, l'amplitude du courant de fuite était faible (25 mA). Le courant était en avance par rapport à la tension (Figure II.9). Cela veut dire que c'est la composante capacitive du courant de fuite qui domine (la capacité est créée par la zone propre du haut de l'élément). La forme du courant contient aussi des pics qui sont dus aux étincelles.

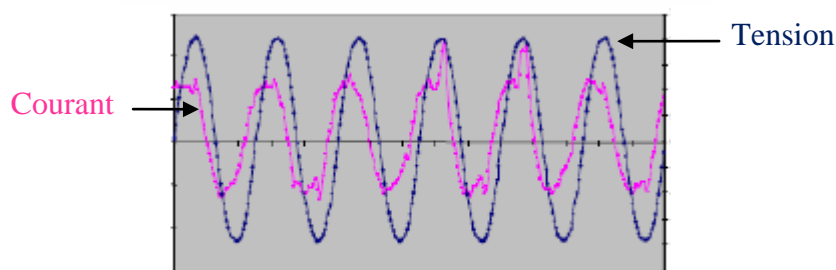


Figure II.9 : Tension et courant de fuite relevés cas d'isolateur non-uniformément pollué

II.2.4 Travaux de Meghnefi, Volat et Farzaneh [25]

Ces chercheurs ont fait une analyse, en temps et en fréquence, du courant de fuite circulant sur la surface de l'isolateur pendant l'accumulation de la glace sur celle-ci. Leur travail a montré la variation du courant de fuite (en forme et en amplitude) en fonction du temps d'application de la tension. Cette variation, qui a eu lieu sous la contrainte climatique (dépôt de la glace), présente deux zones distinctes, caractérisées chacune par une forme et un spectre

particuliers du courant de fuite. La première zone est caractérisée par une amplitude de courant de fuite quasi constante et relativement faible ; ce courant garde une forme sinusoïdale en avance par rapport à la tension. Le déphasage est principalement dû à la phase initiale du dépôt de la glace sur la surface isolante.

Une phase de transition entre les deux zones était marquée par des décharges électriques autour des assiettes ; au fur et à mesure que la sévérité augmente (augmentation de la quantité de la glace), l'amplitude du courant de fuite augmente ainsi que le nombre de pics de courte durée. Durant cette phase, la forme du courant de fuite commence à marquer des distorsions et tend à devenir en phase avec la tension ; ainsi l'analyse spectrale montre l'augmentation de l'amplitude des harmoniques (les plus importants sont le cinquième et le troisième). Il a été remarqué que la durée de la première phase dépend du taux de formation de la glace.

II.2.5 Travaux sur la pollution marine

Keller-Jacobsen [26] a effectué des travaux sur site, dans plusieurs stations de mesure placées à différentes distances de la mer. Ces travaux lui permettent d'évaluer, d'une part, le degré de pollution et d'autre part, d'établir une distinction entre la pollution sur la surface supérieure et la surface inférieure de l'isolateur.

Les résultats obtenus montrent que :

- les isolateurs du type capot et tige anti-brouillard reçoivent le dépôt maximal.
- les isolateurs à long fût avec les dessous de la surface de l'isolateur nervuré recevront plus de dépôts par rapport aux isolateurs dont les dessous sont lisses.

Une autre étude, très précise, est effectuée bien plus tard par **Swift** [27] sur la pollution marine. Il résulte de l'étude de **Swift**, que la trop grande concentration des particules polluantes autour de la tige est due, non seulement aux mauvaises propriétés d'auto-nettoyage de la surface inférieure de l'isolateur, mais également à la nature "rugueuse" du ciment compris entre la tige et la porcelaine, lequel a donc le défaut de "retenir" les particules de sel. Cette rétention provoque alors la corrosion de la tige, laquelle peut, à la longue, conduire au claquage de la porcelaine. L'auteur préconise alors, entre autres, de diminuer la proportion de sable dans le mortier utilisé, ou alors de recouvrir, par exemple, la zone de scellement par une fine couche de bitume afin de lisser l'espace tige-porcelaine.

II.2.6 Travaux sur la pollution désertique

M.A.B. El Koshairy et ses collaborateurs [28], dans des conditions de pollution désertique, ont observé, après une exposition de six mois de chaînes d'isolateurs, une densité de pollution

maximale sur les isolateurs situés le plus près des conducteurs sous tension, alors qu'elle est minimale sur les éléments reliés aux consoles.

Par ailleurs, la quantité de pollution déposée sur un isolateur augmente, lorsque la tension qui lui est appliquée, augmente. Lorsque la chaîne devient plus longue, le rapport entre la densité maximale et la densité minimale du dépôt de pollution augmente. Ce qui accentue encore davantage la non-uniformité de la répartition de la pollution le long de la chaîne.

Le travail de **M. Awad** et al. [29] porte sur l'étude de l'effet du vent, sa vitesse et les particules de sable, sur la tension de contournement des chaînes d'isolateurs. Par ailleurs, des essais expérimentaux sont effectués sur des chaînes d'isolateurs en laboratoire, en simulant la tempête de sable, avec une vitesse variable, sous une tension alternative et continue. Les mêmes essais ont été faits sous des conditions naturelles.

Les résultats obtenus à partir de cette investigation, ont permis à l'auteur de conclure que :

- La tension de contournement augmente avec l'augmentation de la vitesse du vent (Figure II.10 (a)).
- La présence des particules de sable diminue la rigidité diélectrique des isolateurs (Figure II.10 (b)).
- De plus, cette diminution sera plus importante en appliquant une tension continue.

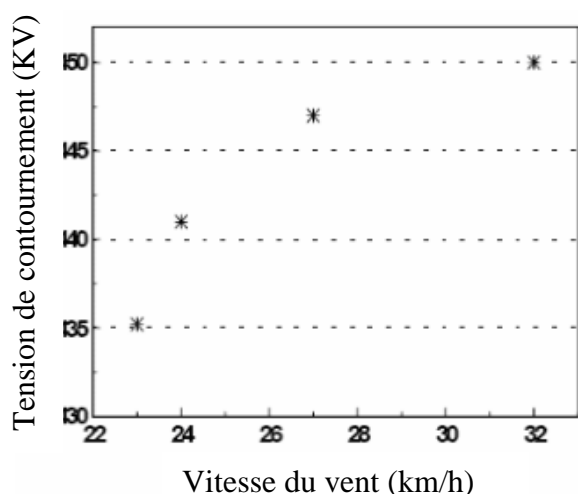


Figure II.10.a : Effet de la vitesse du vent sur le contournement des isolateurs

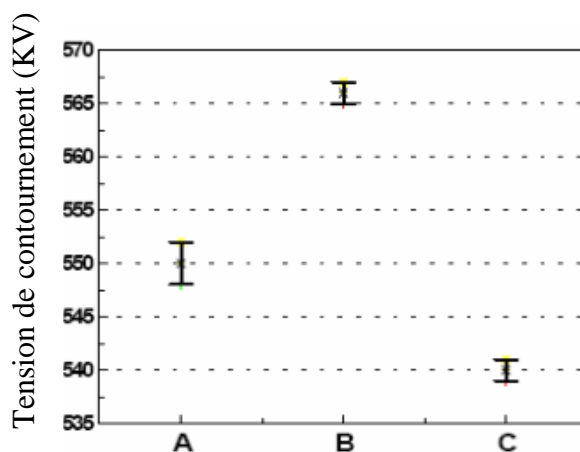


Figure II.10.b: Effet de la pollution désertique sur le contournement des isolateurs (A : chaîne d'isolateurs propre et sèche, B : chaîne d'isolateurs en présence du vent, C: chaîne d'isolateurs en présence du vent de sable)

II.2.7 Travaux de Yong Zhou et al [30]

Ces auteurs ont exploité les informations procurées par le signal du courant de fuite, pour caractériser l'état de surface d'un isolateur SIR de type EVA. Les résultats ainsi obtenus ont été comparés à ceux trouvés sur un modèle de laboratoire développé par ces mêmes chercheurs. Le diagnostic à partir du courant de fuite a été pris en considération, suite à l'intérêt porté par l'équipe sur les propriétés hydrophobes du matériau et l'évaluation des dégradations occasionnées sur les propriétés d'isolations [31].

Cette étude a également tenu compte du comportement des décharges électriques qui ont lieu à la surface des polymères :

- Les arcs locaux qui surviennent dans les bandes sèches.
- Les décharges partielles qui sont provoquées par la triple jonction entre les gouttelettes d'eau, le polymère et l'air à cause de la différence de la permittivité de chacun d'entre eux.

Le mode expérimental a pris en considération la pollution par humidification, vu qu'elle est largement utilisée dans les recherches, pour l'étude des performances électriques des polymères sous haute tension.

La pollution des isolateurs, réel et modèle (Figure II.11), est faite avec une solution de 3 litres d'eau distillée qui contient 40 g/l de Tonoko et 12 g/l de NaCl. Les mesures effectuées avec l'ESDD indiquent 0.03 mg/cm^2 pour cette solution. La pollution des surfaces est effectuée par pulvérisation et la tension appliquée est de 4.8 kV et 13.3 kV respectivement pour le modèle et l'isolateur réel. Une caméra sert à suivre le phénomène de décharge et un oscilloscope relié à un PC permet l'acquisition des signaux du courant de fuite. L'évaluation du champ électrique, en utilisant la méthode des éléments finis, indique les zones de fortes intensités.

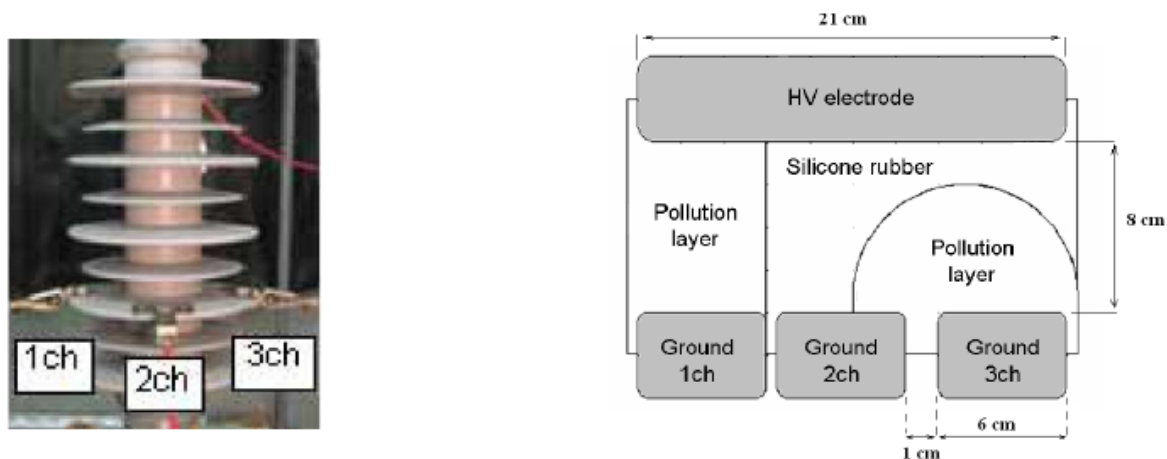


Figure II.11 : Isolateur réel utilisé (à gauche) et son modèle à droite

Les résultats obtenus lors de l'analyse des courants (modèle plan) 1ch, 2ch et 3ch montrent que 1ch a une forme parfaitement sinusoïdale due à l'uniformité de la couche de pollution (caractère parfaitement résistif) ; 2ch et 3ch ont une forme distordue due, d'une part à l'activité intense des décharges, et d'autre part, à la non-uniformité de la couche de pollution (Figure II.12). Ces décharges sont le résultat d'une valeur du champ électrique qui dépasse celle de la rigidité diélectrique du système ainsi formé.

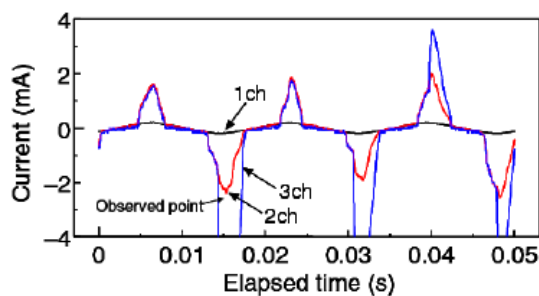


Figure II.12 : Formes d'ondes du courant de fuite du modèle

Pour l'isolateur de type EVA, les trois signaux du courant de fuite ont une densité non-uniforme (Figure II.13). Ce phénomène est le résultat de l'irrégularité du profil de l'isolateur. L'apparition d'arcs locaux est causée par l'assèchement de certaines zones, dû à cette densité de courant non-uniforme. La surveillance par caméra de l'activité des décharges, a permis de détecter la position de celles-ci en fonction de la variation d'amplitude de 1ch, 2ch et 3ch :

- Une décharge apparaît à 37 ms sur 1ch.

- Le déplacement de cette décharge de 1ch à 2ch à 38ms est caractérisé par l'augmentation de l'amplitude des courants 1ch et 2ch.
- L'apparition de la décharge entre 2ch et 3ch, après 1 ms, engendre une augmentation de l'amplitude du courant 3ch.

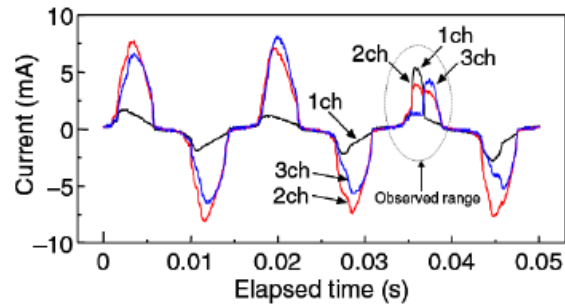


Figure II.13 : Formes d'ondes des courants de fuite de l'isolateur réel

Cette étude permet de conclure que le courant de fuite peut être utilisé comme moyen de détection des positions des décharges partielles, et qu'il identifie l'état de surface de l'isolateur, compte tenu de l'irrégularité de son profil.

II.2.8 Travaux de Metwally et al [32]

Ces auteurs ont conduit une série d'essais expérimentaux sur des chaînes isolateurs 33 kV de formes et composantes différentes. Pour cela, trois chaînes d'isolateurs de ligne et de poste ont été utilisées: la première, propre, revêtue en silicone (Figure II.14.a), la deuxième en porcelaine déjà exploitée (Figure II.14.b) et la troisième propre en polymère (Figure II.14.d). Une quatrième chaîne d'isolateur a été aussi utilisée. Elle est composée de quatre éléments capôt et tige propres (Figure II.14.c). Les quatre chaînes d'isolateurs sont représentées par la Figure suivante :

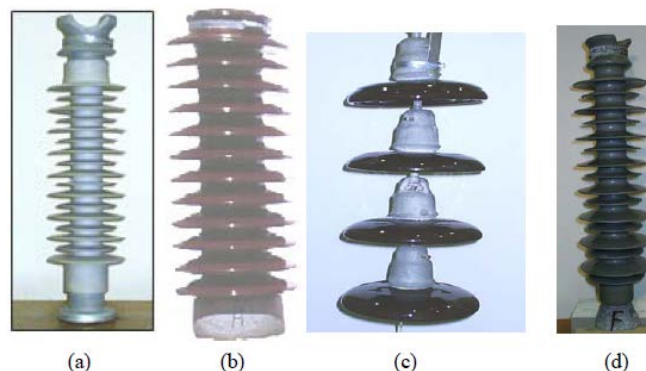


Figure II.14 : Chaînes d'isolateurs de ligne 33kV utilisées

Ces chercheurs ont étudié le comportement de ces isolateurs sous les conditions suivantes : pollution sous brouillard salin et pollution humide sous différentes conductivités.

Le dispositif expérimental est constitué d'un transformateur HT 380V/400kV, de l'isolateur, et d'une résistance shunt de 10 kv afin de mesurer le courant de fuite. Les essais du brouillard salin étaient conduits dans une chambre spéciale (2m×2m×2.5m) avec un contrôle total de la température à 25° et de l'humidité à 100%.

La figure II.15 illustre la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, dans le cas d'une pollution sous brouillard salin, et cela pour les différents types d'isolateurs.

La figure II.16 représente la variation de la tension de contournement en fonction de la concentration du NaCl, pour le cas de la pollution humide et pour les différents isolateurs.

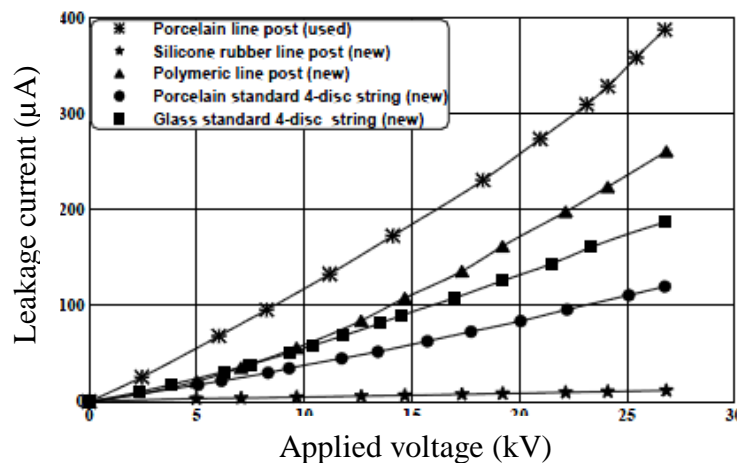


Figure II.15 : Courant de fuite en fonction de la tension pour chaque type d'isolateur

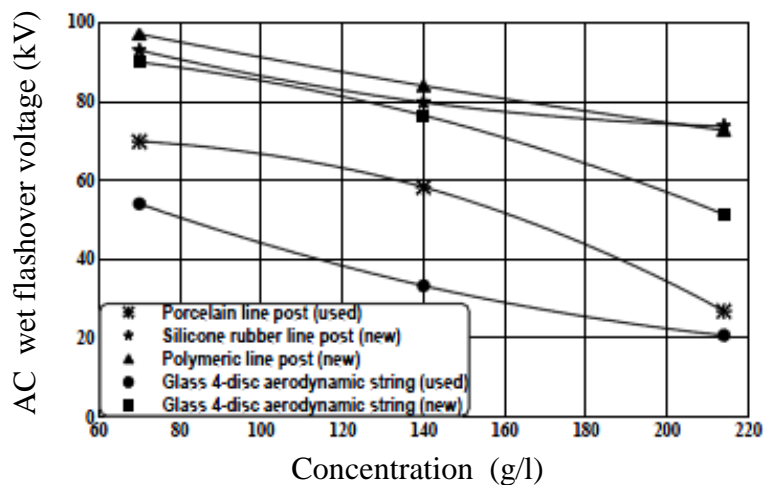


Fig II.16 : Tension de contournement en fonction de la concentration du NaCl pour chaque type d'isolateur

Metwally et al ont conclu que l'isolateur revêtu en silicone (silicon rubber SIR) possède une performance supérieure à celle des isolateurs en verre et en porcelaine de différents designs.

Dans le cas sec, tous les isolateurs ont des valeurs de courant de fuite basses et proches les unes des autres.

Le courant de fuite dans l'isolateur SIR est le plus petit, dans le cas sec et dans le cas du brouillard salin, grâce à son excellent profil hydrophobe.

II.3 Travaux sur les distributions du champ et du potentiel électriques

II.3.1 Travaux expérimentaux

➤ Travaux de Brettschneider [33]

Dans cette étude, les mesures ont été effectuées sur une chaîne de six isolateurs de type capôt et tige suspendus, recouverte de glace. Les isolateurs constituant la chaîne, sont reliés entre eux par des parties métalliques ; les rotules, qui se comportent en fait, comme des électrodes portées à un potentiel flottant. Ainsi, en mesurant le potentiel de ces parties métalliques par rapport à la terre à l'aide d'un voltmètre électrostatique, il est possible de déterminer ainsi la distribution du potentiel le long de la chaîne d'isolateurs recouverte de glace. Cette méthode a donné de bons résultats pour des tensions continues et alternatives, ainsi que pour des dépôts de glace présentant ou non un film d'eau conducteur à leur surface. Les résultats obtenus montrent que la présence d'un film d'eau à la surface du dépôt de glace pendant la fonte, entraîne une augmentation considérable de la chute de tension le long des intervalles d'air par rapport au cas où le film d'eau n'est pas présent.

➤ Travaux de Kaana-Nkusi, Alexander and Hackam [34]

Ils ont déterminé le potentiel et le champ électriques le long d'un isolateur à ailettes. Le système a été modélisé avec 146 anneaux de charges, où 30 charges modélisent chaque électrode. Plusieurs critères ont été appliqués dans le but d'évaluer la qualité des résultats calculés sur le potentiel, la divergence du potentiel, la densité normale du flux électrique et la composante tangentielle du champ électrique. Les résultats montrent que les valeurs maximales du champ électrique le long de la surface augmentent avec celles de la permittivité diélectrique des matériaux isolants.

Diminuer le rayon de courbure de l'ailette de l'isolateur a pour conséquence l'augmentation des composantes normale et tangentielle du champ électrique.

➤ **Travaux de Hartings [35]**

Hartings a introduit plusieurs techniques expérimentales pour étudier le phénomène de décharge sur la surface des isolateurs. Il a utilisé une sonde AC à deux dimensions, disponible à swedish transmission research institute (STRI) qui a été développée par Hornfeldt. Deux voltmètres électro-optiques étaient placés à l'intérieur d'une sphère de 50 mm de diamètre, qui a été divisée en quatre quarts isolés galvaniquement. Les voltmètres électro-optiques modifient la polarisation de la lumière des lames appropriées qui est convertie en volts.

Hartings a aussi lancé une série d'expériences pour étudier le comportement hydrophile et hydrophobe de l'isolateur sous la pluie. Les composantes radiale et axiale du champ électrique le long d'un isolateur sec et sous pluie ont été mesurées.

Dans le cas de l'isolateur sec, aucun effet couronne n'a été observé à 50kV. A 85kV le phénomène de décharge commence à apparaître dans le côté HT.

Dans le cas d'un isolateur sous pluie et pour un profil hydrophile, une distribution capacitive du champ électrique été obtenue seulement dans le cas d'une intensité de pluie modérée (0,4mm/min) et une faible conductivité de la pluie (50 μ S/cm). Une distribution résistive du champ électrique peut être obtenue à des niveaux inférieurs ou égaux à 85kV, pour une intensité de pluie égale à 1,6mm/min et 50 μ S/cm.

Pour un isolateur hydrophobe, une distribution capacitive du champ électrique a été observée dans tous les essais sous les différentes conditions atmosphériques. A 50kV, la distribution du champ électrique a été similaire à celle obtenue dans le cas d'un isolateur sec.

➤ **Travaux de Eklund et Hartings [36]**

Eklund et Hartings ont étudié la distribution du champ électrique le long des isolateurs de type composite et de type céramique sous pollution. Pour cela la même sonde décrite dans les travaux de Hartings [35], a été utilisée. Cette fois-ci, la sonde a été placée à environ 0,2 m loin de l'isolateur, pour éviter l'effet de la décharge. Les composantes radiale et axiale du champ électrique ont été obtenues pour des isolateurs en porcelaine, les isolateurs enrobés RTV, et les isolateurs en composite.

Dans le cas d'un isolateur en porcelaine hydrophile, l'augmentation de la composante axiale du champ électrique a été accompagnée par l'augmentation du courant de fuite de plus de plusieurs centaines de mA.

Dans le cas d'un isolateur composite hydrophobe, la composante axiale du champ électrique est proportionnelle à la quantité de dépôt de la pollution sur la surface de l'isolateur.

II.3.2 Travaux de simulation numérique

➤ Travaux de Zhao et Comber [37]

Leurs travaux consistent à étudier les distributions du potentiel et du champ électriques le long des isolateurs non céramiques par le biais du logiciel « Coulomb ».

L'isolateur, la tour et les conducteurs ont été pris en considération dans les calculs. Les résultats ont montré que la longueur des conducteurs a un effet de blindage très significative sur l'isolateur ; le maximum du champ électrique diminue lorsque la longueur des conducteurs augmente.

➤ Travaux de Chakravorti et Mukherjee [38]

Ils ont développé un algorithme basé sur la méthode de simulation de charges, pour calculer la distribution du champ électrique sur un isolateur de haute tension, sous pollutions uniforme et non-uniforme. Le produit de la résistivité électrique du contaminant (Ω/m) et l'épaisseur de la couche de pollution (m) donne un seul paramètre ρ_s , appelé la résistivité surfacique.

Ils ont trouvé que pour des $\rho_s \geq 10^{11} \Omega$, le champ est capacitif. Alors que pour $\rho_s \leq 10^8 \Omega$, il est résistif. Pour des valeurs intermédiaires, le champ est capacitif-résistif.

La valeur maximale du champ électrique résistif est deux fois plus grande que celle correspondante au champ capacitif. Ce maximum se produit dans la pointe de la plus haute ailette.

Pour la pollution non-uniforme, une très grande surtension est apparue dans les jonctions de deux milieux avec deux résistivités surfaciques différentes. Une pollution partielle de la surface de l'isolateur proche des électrodes, mène vers une surtension supérieure à celle dans le cas de la pollution uniforme.

L'effet des zones sèches a été aussi étudié. Plus la zone sèche est large, moins il y aura une surtension au niveau des frontières de la zone sèche. La position de la zone sèche n'a pas une grande influence sur le champ électrique au niveau des frontières de cette zone.

➤ Travaux de El-Kishky et Gorur [39]

El-Kishky et Gorur ont utilisé la méthode de simulation de charge modifiée pour le calcul du champ et potentiel électriques le long des isolateurs de haute tension.

Un modèle exacte de l'isolateur peut être réalisé avec une réduction significative du nombre de charges utilisées dans cette méthode. Ils ont étudié la distribution du champ électrique et de l'énergie des isolateurs humides.

La surface humide du modèle de l'isolateur est une plaque rectangulaire de 2cm · 25cm, avec des différentes gouttelettes d'eau de 50 mm³ jusqu'à 900 mm³. La relation entre la valeur maximale du champ électrique et la taille, la distance et la localisation des gouttelettes ont été étudiées. L'augmentation du nombre de gouttelettes diminue la valeur maximale du champ électrique. L'éloignement des gouttelettes les unes par rapport aux autres, mène à la réduction du champ électrique maximum. Les gouttelettes situées à proximité de l'électrode HT étaient soumises à une intensification remarquable du champ électrique.

➤ **Travaux de Volat [40]**

L'objectif principal du travail de **Volat** [40] consiste en le calcul des distributions du potentiel et du champ électriques, le long d'un isolateur de poste standard, recouvert de glace accumulée en régime humide.

Il s'agit alors, pour l'auteur, de comprendre les phénomènes précédant les contournements électriques des isolateurs de poste qui se produisent généralement en période de fonte. Une étude numérique a été utilisée par l'intermédiaire d'un logiciel de simulation, basé sur la méthode des Éléments Finis de Frontière, bidimensionnel puis tridimensionnel.

Les différents résultats obtenus à partir des simulations 2-D, ont permis de mettre en évidence l'influence des paramètres, tels que la présence d'un film d'eau conducteur à la surface du dépôt de glace, la position et la longueur d'un intervalle d'air, la conductivité du film d'eau et la présence d'un arc électrique partiel le long d'un intervalle d'air unique, sur la distribution du potentiel et du champ électriques.

Les deux distributions du potentiel obtenues numériquement et expérimentalement ont été comparées. L'auteur a observé une différence importante obtenue entre les résultats expérimentaux et numériques (Figure II.17), confirmant ainsi que la modélisation bidimensionnelle n'est pas vraiment adaptée à la configuration géométrique de l'isolateur.

L'erreur relative moyenne est de 33%. Ce qui démontre la nécessité des simulations tridimensionnelles, afin d'obtenir des résultats plus précis.

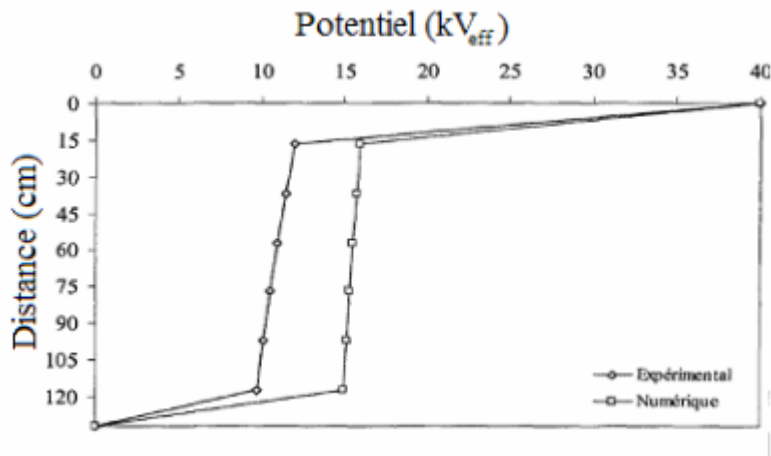


Figure II.17 : Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour une simulation 2D

Les simulations tridimensionnelles ont été réalisées avec le logiciel Coulomb (utilisant toujours la méthode des éléments finis de frontière). La comparaison des résultats numériques, obtenus par le biais du logiciel, avec les résultats expérimentaux, a montré une très bonne concordance (Figure II.18). Cela a ainsi permis de valider la modélisation utilisée en 3-D de l'isolateur de poste recouvert de glace présentant un film d'eau conducteur à la surface du dépôt de glace, lorsque aucun arc électrique partiel n'était présent le long des intervalles d'air.

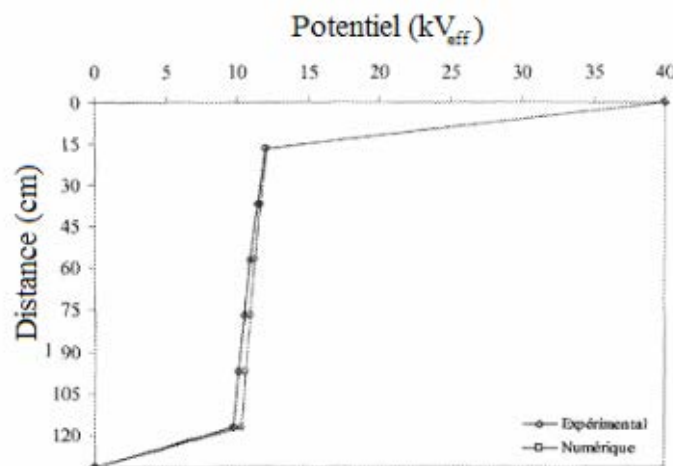


Figure II.18 : Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour une simulation 3D

➤ **Travaux de Aydogmus et Cebeci [41]**

Un modèle dynamique basé sur le critère du champ a été développé par Aydogmus et Cebeci pour étudier le phénomène de contournement d'un isolateur HT, en présence d'une couche de pollution à sa surface, sous tension alternative.

Les valeurs du champ et du potentiel électriques ont été déterminées en utilisant la méthode des éléments finis (FEM). Un modèle bidimensionnel (dit 'ouvert') d'un isolateur capôt et tige de type BSFT-9336 antibrouillard (ligne de fuite $L=288\text{mm}$, facteur de forme $F=1,09$, hauteur $H=140\text{mm}$) (Figure II.19 (a) et (b)), a été utilisé pour le calcul de la résistance en série avec l'arc.

L'auteur a développé un algorithme appelé NFDM (New Flashover Dynamic Model) pour simuler la formation et la propagation de l'arc électrique sur la surface de l'isolateur, en considérant différentes conductivités surfaciques et longueurs de fuites.

Les résultats du NFDM sont comparés aux résultats théoriques et expérimentaux obtenus par d'autres chercheurs. Une bonne concordance a été observée.

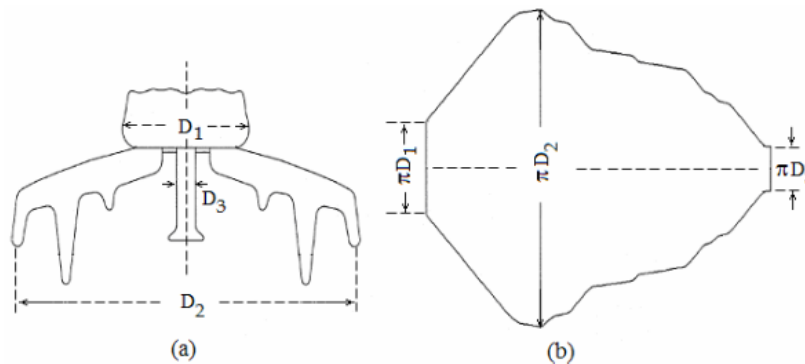


Figure II.19 : Isolateur BSFT-9336 ; (a) : profil réel, (b) : modèle ouvert

II.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons résumé un certain nombre de travaux de recherche qui préoccupent les chercheurs, dans le domaine de la pollution des isolateurs réels.

En effet, nous avons rappelé les principaux travaux rapportés dans la littérature, en vue de décrire les phénomènes de contournement et du courant de fuite. Nous avons également cité les travaux antérieurs sur la détermination expérimentale et numérique du champ et du potentiel électriques.

Chapitre III

Techniques expérimentales et résultats d'essais

III.1 Introduction

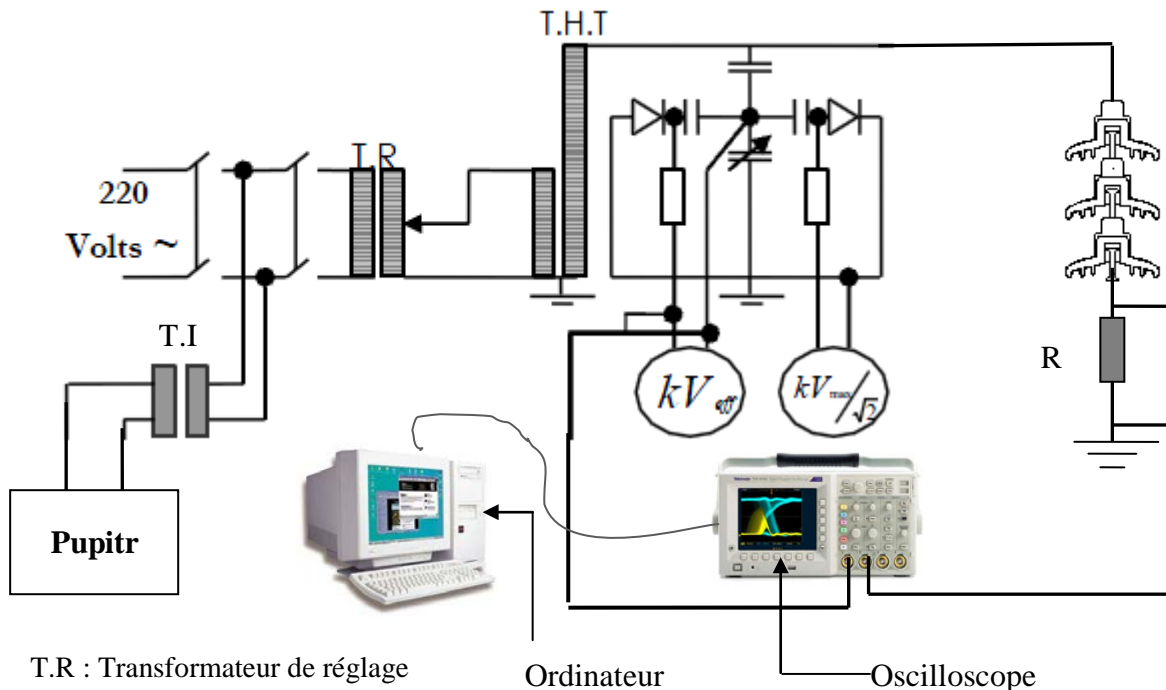
Afin d'étudier l'influence de l'état de surface des isolateurs de haute tension sur le comportement de ces derniers, nous avons effectué des essais au laboratoire sur deux types d'isolateurs : 175 CTV et 1512L. Plusieurs cas ont été considérés : cas d'un seul élément, de deux et de trois éléments.

Les expériences ont été effectuées au laboratoire de haute tension de l'ENP. Ces essais nous ont permis de suivre l'évolution de la tension de contournement, du courant de fuite et de la charge électrique pour différentes conductivités et différents niveaux de tension appliqués.

III.2 Dispositif expérimental

Le laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique est muni d'une station d'essai à fréquence industrielle 50Hz, de marque HEAFELY, composée des équipements suivants :

- Un transformateur d'essai : 500V/300kV, 50kVA.
- Un transformateur de réglage : 220/ (0 à 500V), 50kVA.
- Un diviseur capacitif de tension est alimenté par la tension secondaire du transformateur d'essai et délivre une tension réduite aux bornes des voltmètres installés sur le pupitre de commande. Il est formé d'une capacité de haute tension $C_1 = 400 \text{ pF}$, en série avec une capacité basse tension C_2 variable. Ce qui permet d'obtenir les calibres de mesures : 75kVA, 150kVA et 300kVA.
- Un pupitre de commande où on trouve les appareils de mesure permettant la lecture du courant au secondaire du transformateur de réglage ainsi que des tensions de crête et efficace au secondaire du transformateur d'essai.
- Des appareils annexes de mesure et de protection.
- Un oscilloscope numérique « TEKTRONIX » de bande passante 500MHz.
- Un ordinateur pour l'acquisition des données de la tension appliquée, du courant de fuite qui traverse la surface de l'isolateur, ainsi que de la charge.



T.R : Transformateur de réglage

T.H.T : Transformateur de haute tension (d'essai)

T.I : Transformateur d'intensité

R : Résistance de $1k\Omega$

Figure III.1 : Circuit d'essai

III.3 Objets d'essai

Nous avons effectué les essais sur deux types d'isolateurs réels en verre trempé, de différentes tailles, ou plus exactement de lignes de fuite différentes. Les références de ces isolateurs sont : 1512L et 175 CTV.

Les isolateurs sont de type capôt et tige. Ils sont constitués d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capôt scellé en fonte malléable et à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures et dont la tête conique est également scellée dans le verre. L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer dans le capôt de l'élément suivant, et y être maintenue par une goupille.

III.3.1 Isolateur 1512L

L'isolateur 1512L utilisé est représenté par les deux figures III.2 et III.3. Les dimensions de l'isolateur réel sont mesurées grâce à un mètre ruban non extensible. Nous mesurons la

longueur de la ligne de fuite, la distance de contournement dans l'air (capôt, tige,...), le profil du capôt et celui de la tige. Ces grandeurs sont représentées dans le tableau III.1.



Figure III.2: Isolateur 1512 L

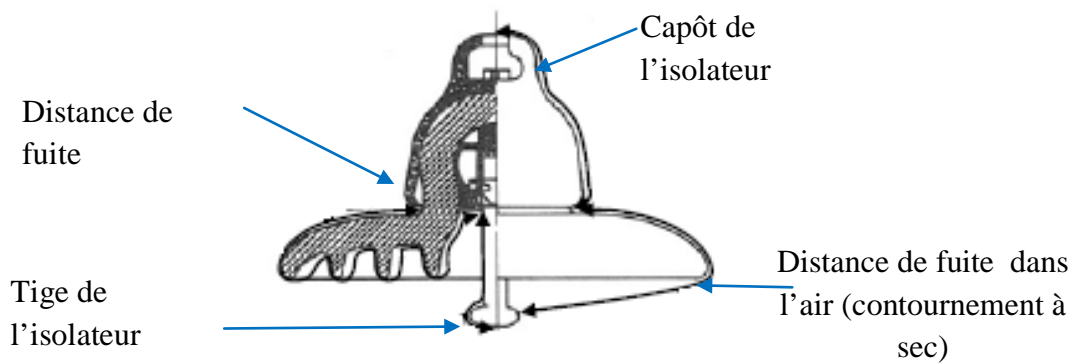


Figure III.3 : Caractéristiques dimensionnelles de l'isolateur 1512 L

Grandeur	Taille (mm)
Longueur de fuite	292
Distance de contournement dans l'air	205
Capôt de l'isolateur	240
Profil de la tige	128

Tableau III.1 : Dimensions de l'isolateur 1512L

III.3.2 Isolateur 175 CTV

L'isolateur 175 CTV utilisé est représenté par les deux figures III.4 et III.5. Ces dimensions sont représentées dans le tableau III.2.



Figure III.4 : Isolateur 175 CTV

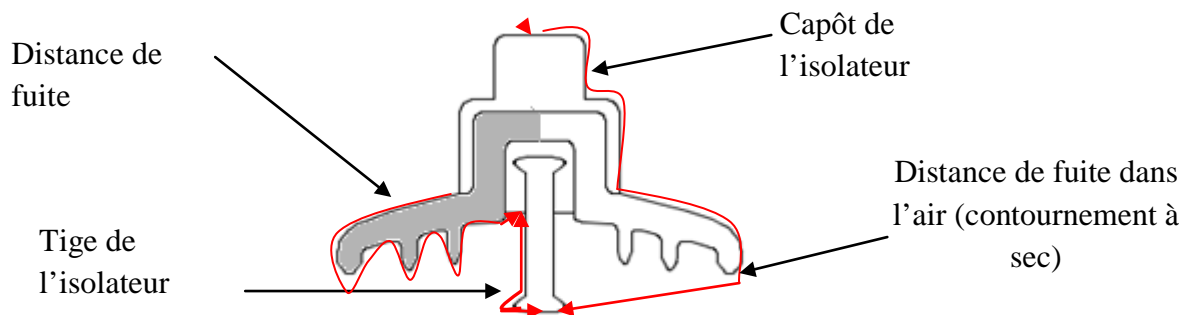


Figure III.5 : Caractéristiques dimensionnelles de l'isolateur 175 CTV

Grandeur	Taille (mm)
Longueur de fuite	210
Distance de contournement dans l'air	149
Capôt de l'isolateur	104
Profil de la tige	53

Tableau III.2 : Dimensions de l'isolateur 175 CTV

III.4 Préparation de l'isolateur avant chaque essai

La reproductibilité des essais dans les mêmes conditions, et plus exactement l'humidification, est une tâche difficile. Pour cela, nous avons pris un certain nombre de précautions.

Avant chaque essai, nous avons nettoyé l'isolateur avec du coton imbibé d'alcool chirurgical. Après chaque essai, l'isolateur est séché en utilisant des serviettes en papier, puis lavé avec de l'eau distillée et encore une fois séché en utilisant toujours des serviettes en papier. Après cela, l'isolateur à tester est soumis à une pulvérisation de la solution saline. Cette procédure est répétée pour chaque essai.

III.5 Préparation des solutions polluantes

Les solutions polluantes ont été préparées au niveau du laboratoire de génie de l'environnement. Ces solutions sont composées de différentes quantités de NaCl mélangées à l'eau distillée. Nous avons joué sur la concentration du NaCl pour obtenir les conductivités volumique voulues. Les valeurs ainsi adoptées sont : 7 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 210 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 740 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Le choix de ces conductivités nous a permis d'obtenir une bonne répartition de la tension de contournement entre les deux cas extrêmes : état sec et propre, et état pollué avec une solution saline de 740 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

III.6 Méthode de pulvérisation

L'humidification de la surface de l'isolateur est obtenue par pulvérisation. L'ouverture du pulvérisateur est gardée, tout au long des essais, à la même position.

Trois pulvérisations ont été appliquées à la surface supérieure de l'isolateur 175 CTV et trois pulvérisations à sa surface inférieure, et cela suivant quatre orientations différentes.

Les mêmes conditions d'essais ont été préservées pour l'isolateur 1512L. Etant donné qu'il possède un profil plus grand que celui de l'isolateur 175 CTV, nous avons jugé utile d'augmenter le nombre de pulvérisations à six pour chaque surface.

Dans le cas de la pulvérisation de la surface supérieure, le pulvérisateur se trouve au même niveau que l'isolateur et horizontalement par rapport au sol. Dans le cas de la pulvérisation de la surface inférieure, le pulvérisateur fait approximativement un angle de 45° en dessous du même isolateur. La même procédure a été gardée pour les chaînes de deux et trois éléments.

III.7 Circuits de mesure

III.7.1 Mesure de la tension de contournement

La mesure de la tension de contournement a été effectuée pour chaque configuration à l'aide d'un voltmètre électrostatique, donnant la valeur de la tension en kilovolts efficaces. Cette mesure permet également de déterminer les paliers de tension à appliquer, pour l'enregistrement du courant de fuite et de la charge. Conformément aux normes utilisées (CEI 158), la valeur considérée représente la moyenne arithmétique de six mesures.

III.7.2 Mesure du courant de fuite et de la charge

Le courant est mesuré à travers une résistance R de $1k\Omega$, non inductive, connectée entre l'électrode HT et la terre. L'onde est reportée à l'aide d'un câble coaxial, permettant la visualisation de la tension (image du courant) sur un oscilloscope numérique de marque TEKTRONIX et d'une bande passante de 500 MHz. Les informations obtenues sont enregistrées par l'oscilloscope et transmises à un ordinateur pour y être traitées. Pour éviter l'influence des parasites sur le signal recueilli, la résistance est introduite dans une boîte métallique couverte avec du papier aluminium, formant ainsi un écran électrostatique.

Pour la mesure de la charge électrique, nous avons utilisé le même circuit que celui de la mesure du courant de fuite, en remplaçant la résistance par une capacité de $0.5 \mu F$.

Afin de recueillir totalement le signal de la tension aux bornes de la résistance ou de la capacité, nous avons utilisé un adaptateur à l'entrée de l'oscilloscope ayant une résistance du câble de mesure de $6.6k\Omega$.

III.8 Résultats des essais et discussions

III.8.1 Tension de contournement

Durant les essais de contournement, nous avons entendu, à partir d'un certain niveau de tension propre à chaque cas considéré, un bruit audible qui croît en augmentant la tension. Ce bruit est la conséquence de l'effet couronne, qui est une phase initiale du contournement.

Nous avons aussi pu constater que pour les couches de pollution de grandes conductivités, l'arc adopte un trajet préférentiel le long de la ligne de fuite. En revanche, une faible conductivité de la couche polluante favorise le claquage dans l'air entre les jupes.

➤ **Influence de la conductivité**

Dans cette partie, nous nous intéressons à la variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité de la couche polluante. Les figures III.6 et III.7 représentent respectivement, la variation de la tension de contournement des chaînes d'isolateurs 1512L et 175 CTV, pour un, deux et trois éléments, en fonction de la conductivité de la solution saline.

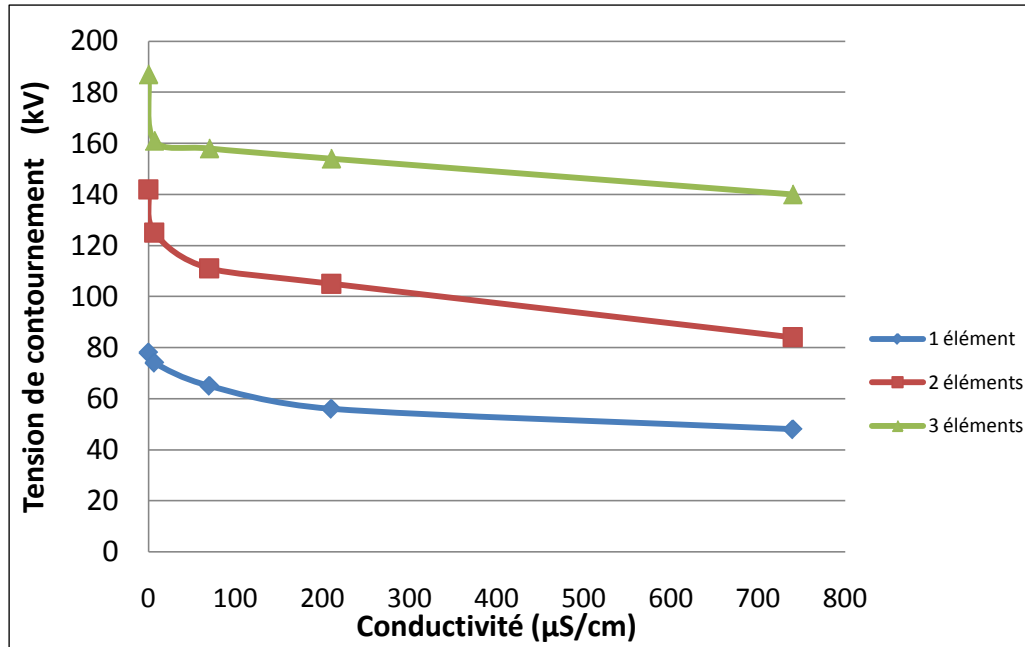


Figure III.6 : Tension de contournement en fonction de la conductivité cas de l'isolateur 1512L

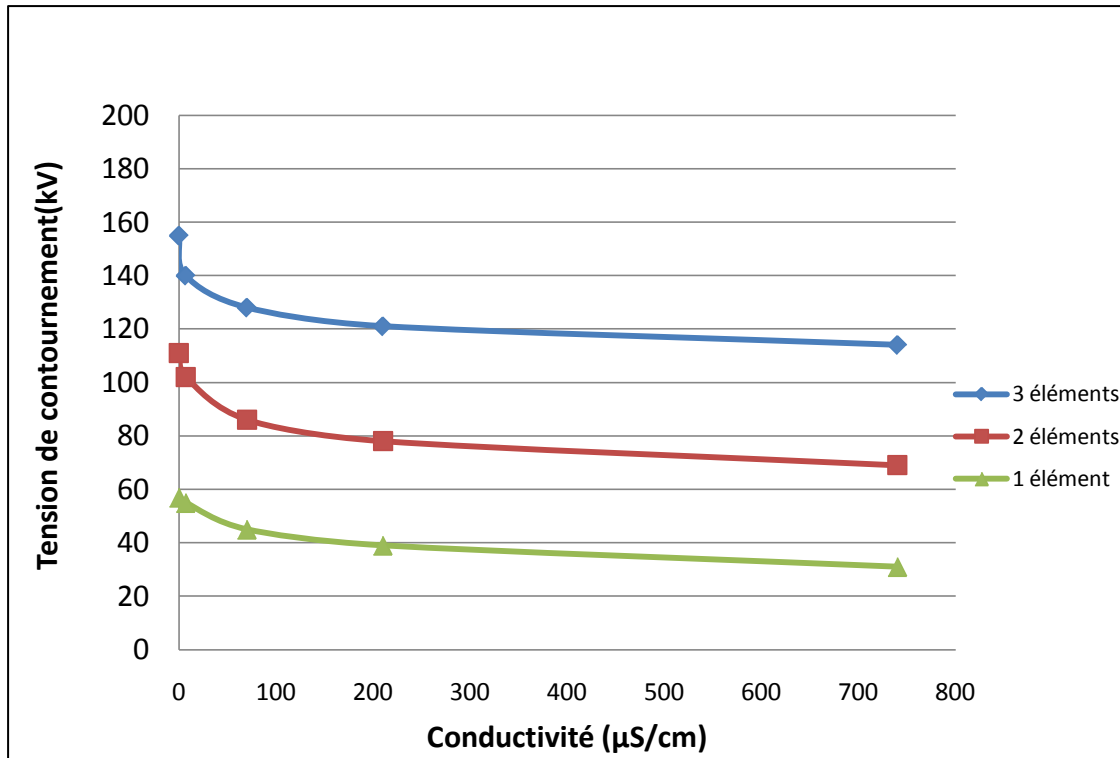


Figure III.7 : Tension de contournement en fonction de la conductivité cas de l'isolateur 175 CTV

Pour un même nombre d'éléments, nous constatons, d'après ces figures, qu'avec l'augmentation de la conductivité, la tension de contournement diminue rapidement pour les conductivités allant de 0 à 210 $\mu\text{S/cm}$ et lentement ailleurs. Au-delà de 210 $\mu\text{S/cm}$, cette tension a tendance à se stabiliser.

➤ Influence du nombre d'isolateurs

Pour étudier l'effet du nombre d'isolateurs sur la tension de contournement, nous avons conduit une série d'essais de contournement en utilisant des chaînes d'isolateurs 1512L et 175CTV avec un, deux et trois éléments. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures III.8 et III.9

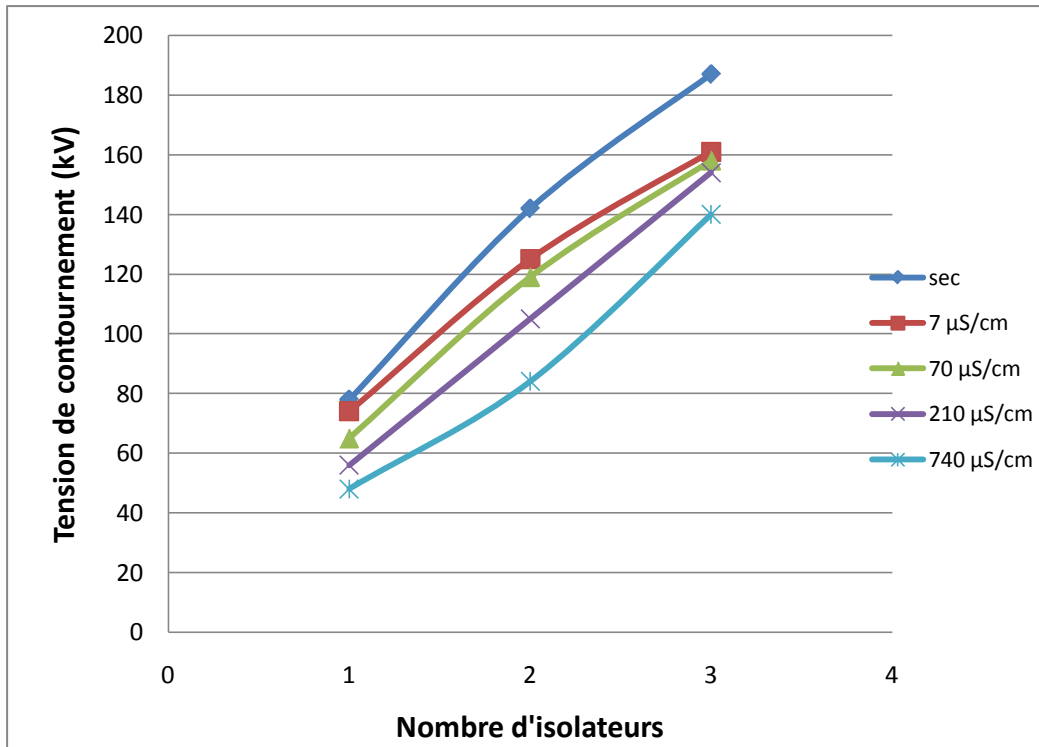


Figure III.8 : Influence du nombre d'isolateurs 1512L sur la tension de contournement

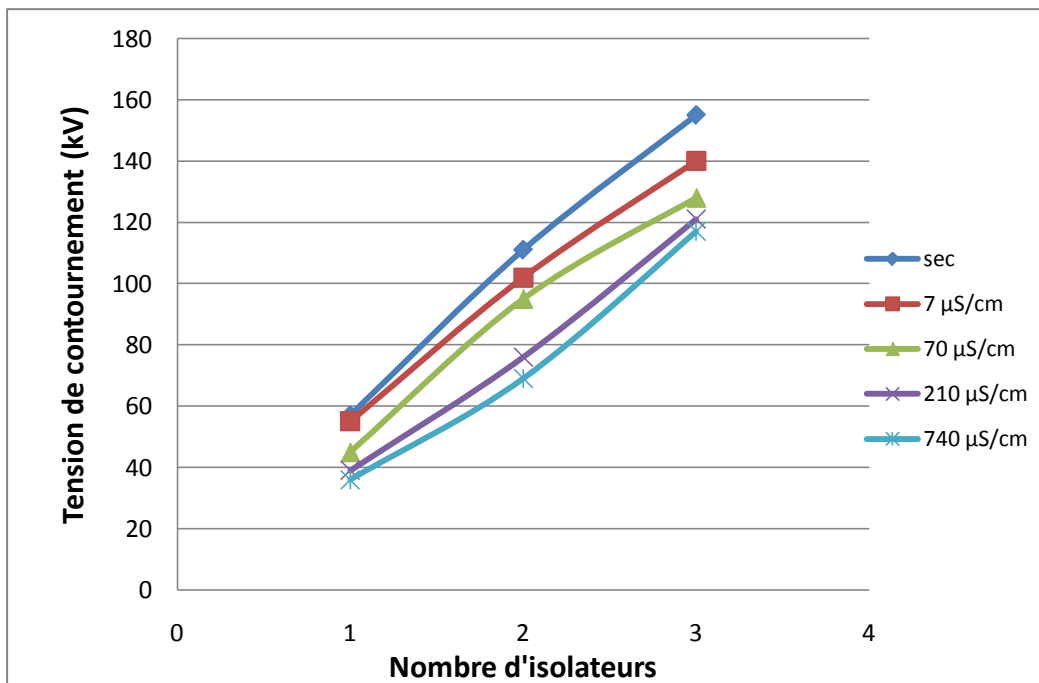


Figure III.9 : Influence du nombre d'isolateurs 175 CTV sur la tension de contournement

Nous remarquons que la tension de contournement est affectée par le nombre d'isolateurs utilisés dans une chaîne. Ceci est valable pour les deux types d'isolateurs. Il est évident que la tension de contournement augmente avec le nombre d'isolateurs dans une chaîne. En effet, elle est plus élevée lors de l'utilisation d'une chaîne de trois éléments, et plus faible pour le cas d'une chaîne à un élément. Ceci peut être expliqué par l'effet de la longueur de la ligne de fuite, puisque cette longueur croît avec le nombre d'éléments utilisés dans une chaîne. Plus la longueur de la ligne de fuite est grande, plus le trajet emprunté par les arcs locaux prenant naissance avant le contournement, est long, ce qui a pour effet d'augmenter la tension de contournement.

Nous constatons aussi que la tension de contournement n'est pas proportionnelle au nombre d'isolateurs. A titre d'exemple la tension de contournement d'une chaîne de trois éléments est inférieure à trois fois la tension de contournement d'un élément, ceci est évident, puisque l'arc emporte des raccourcis préférentiels dans l'air entourant les isolateurs.

➤ **Influence du profil de l'isolateur**

Afin d'étudier l'influence du profil de l'isolateur sur la tension de contournement, nous avons comparé, pour une conductivité de $210 \mu\text{S}/\text{cm}$, la tension de contournement des deux chaînes d'isolateurs 1512L et 175 CTV ayant un, deux et trois éléments. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure III.10.

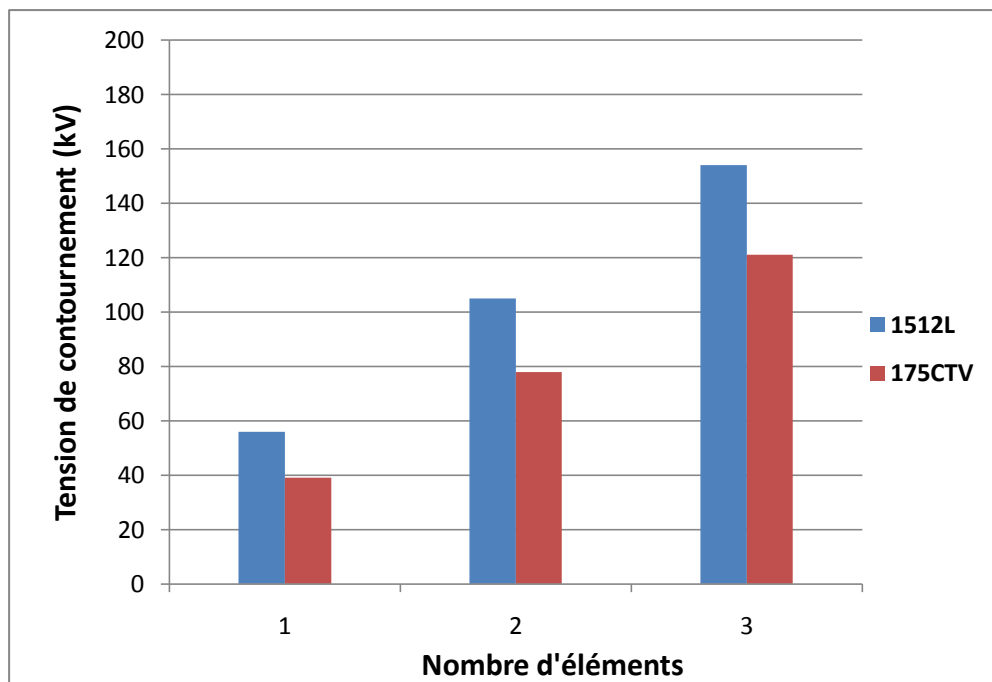


Figure III.10 : Influence du profil de l'isolateur sur la tension de contournement

En observant ces histogrammes, nous constatons que quel que soit le nombre d'éléments, la tension de contournement est toujours plus élevée dans le cas de l'isolateur 1512L, malgré que ce dernier ait été soumis en tout à 24 pulvérisations contre 12 pour le 175 CTV. Cette différence est imputée plutôt à la géométrie. L'isolateur 1512L possède un profil beaucoup plus grand que celui du 175 CTV. Comme conséquence, la ligne de fuite est plus importante dans le cas de l'isolateur 1512L. La tension de contournement de ce dernier est la plus élevée.

III.8.2 Courant de fuite

Le courant obtenu est un signal périodique présentant des déformations. Ces dernières se présentent sous la forme de pics au niveau des deux alternances (positive et négative), et deviennent plus importantes avec l'accroissement de la tension appliquée. Les figures III.11 et III.12 illustrent les deux signaux relatifs à la tension appliquée et le signal aux bornes de la résistance représentant ainsi l'image du courant de fuite. Nous remarquons aussi une légère distorsion de la sinusoïde de la tension appliquée qui provient du réseau d'alimentation.

Le courant relevé est de nature purement capacitive, car le courant de fuite est en avance sur la tension d'alimentation de 90° (presque), ceci est dû au phénomène de ruissèlement et à l'apparition de zones sèches. Notons que les valeurs lues sur l'oscilloscope sont des valeurs efficaces.

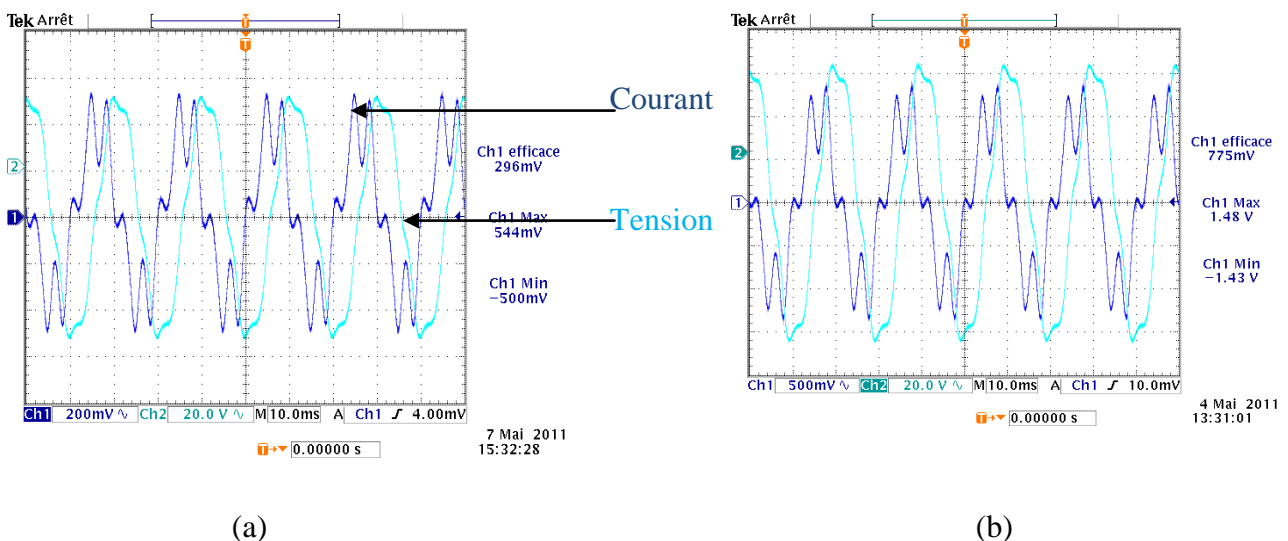


Figure III.11 : Formes des signaux de la tension appliquée et du courant de fuite pour le cas de l'isolateur 1512L avec une conductivité de $70 \mu\text{S}/\text{cm}$ et une tension de : (a) 10kV, (b) 20kV

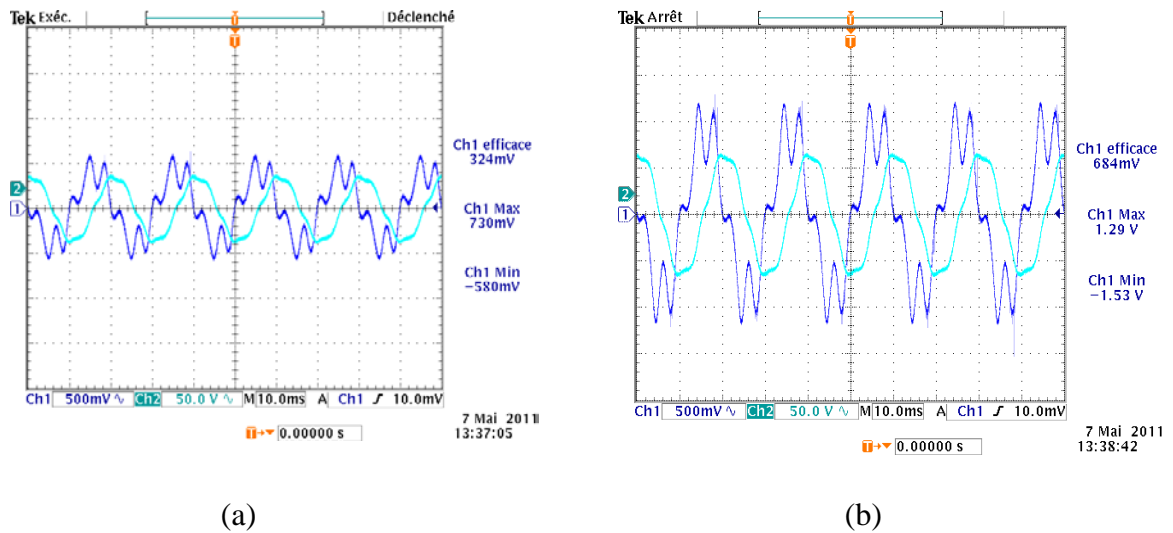


Figure III.12 : Formes des signaux de la tension appliquée et du courant de fuite pour le cas de l'isolateur 175 CTV avec une conductivité de $70 \mu\text{S}/\text{cm}$ et une tension de : (a) 10kV, (b) 20kV

➤ **Effet de la tension appliquée**

Les figures III.13 à III.18 illustrent, respectivement pour un, deux et trois éléments, la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, et cela pour les différentes conductivités et les deux types d'isolateurs.

Dans le but de protéger les appareils de mesure et de visualisation du courant de fuite, nous étions obligés de nous limiter, pour chaque cas considéré, à des niveaux de tensions suffisamment inférieurs à la valeur de la tension de contournement. Ces paliers de tension appliquée ne dépassent en aucun cas 50 % de la tension de contournement.

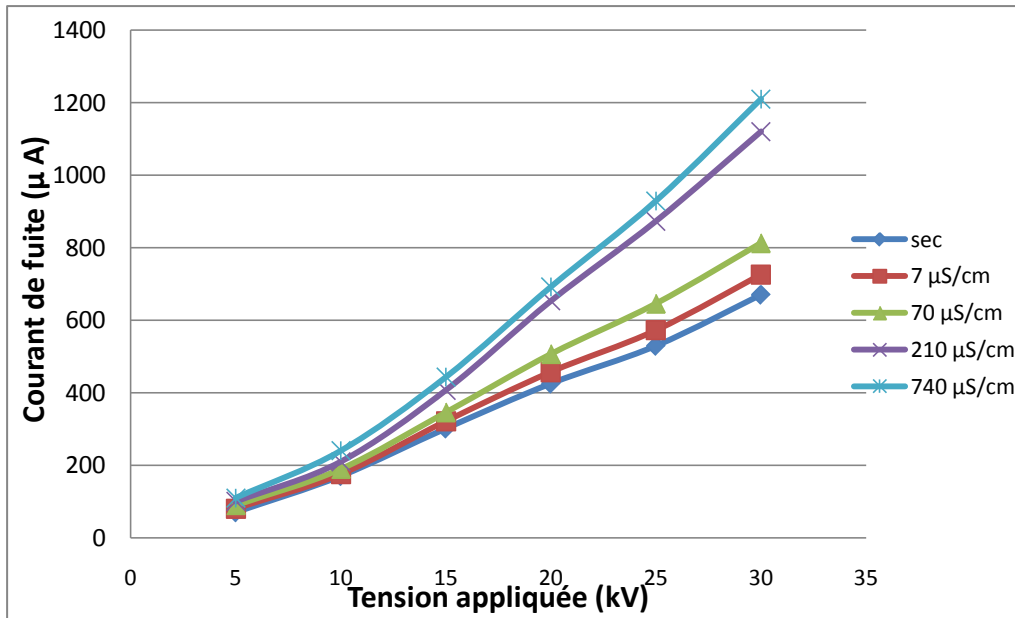


Figure III.13 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée dans le cas d'un isolateur 1512L

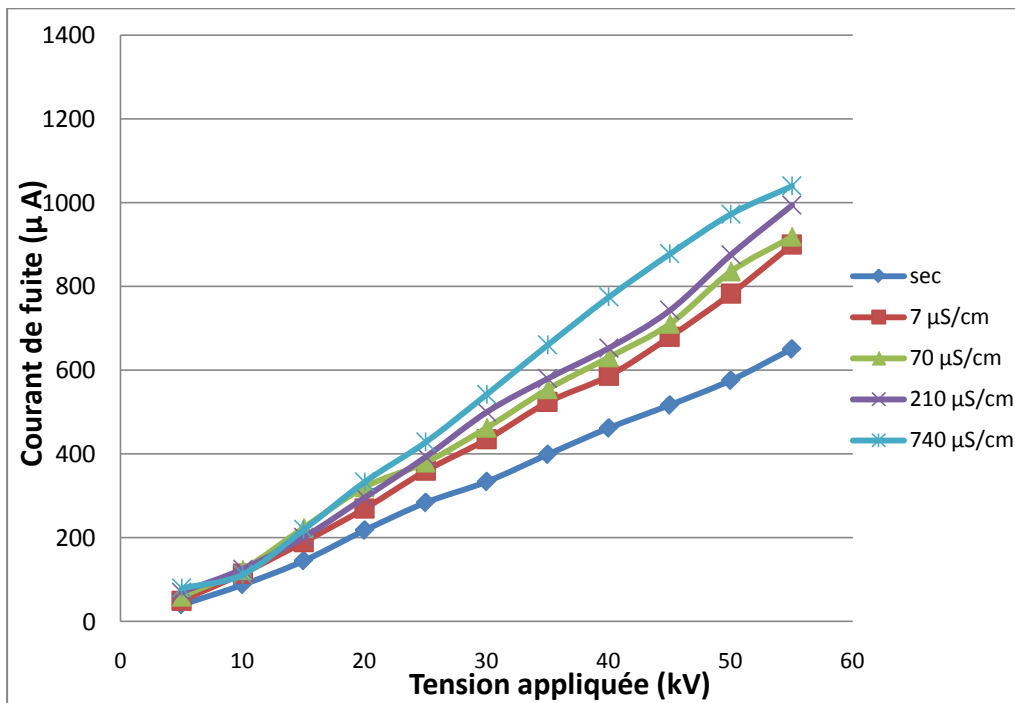


Figure III.14 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée dans le cas de deux isolateurs 1512L

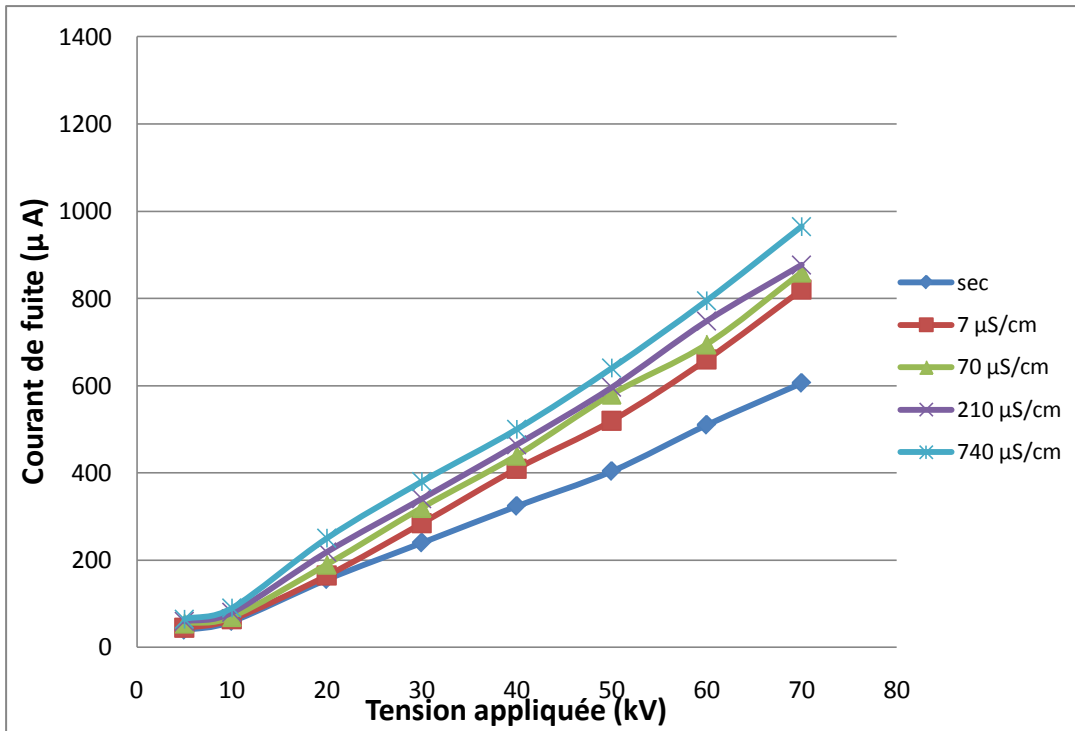


Figure III.15 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée dans le cas de trois isolateurs 1512L

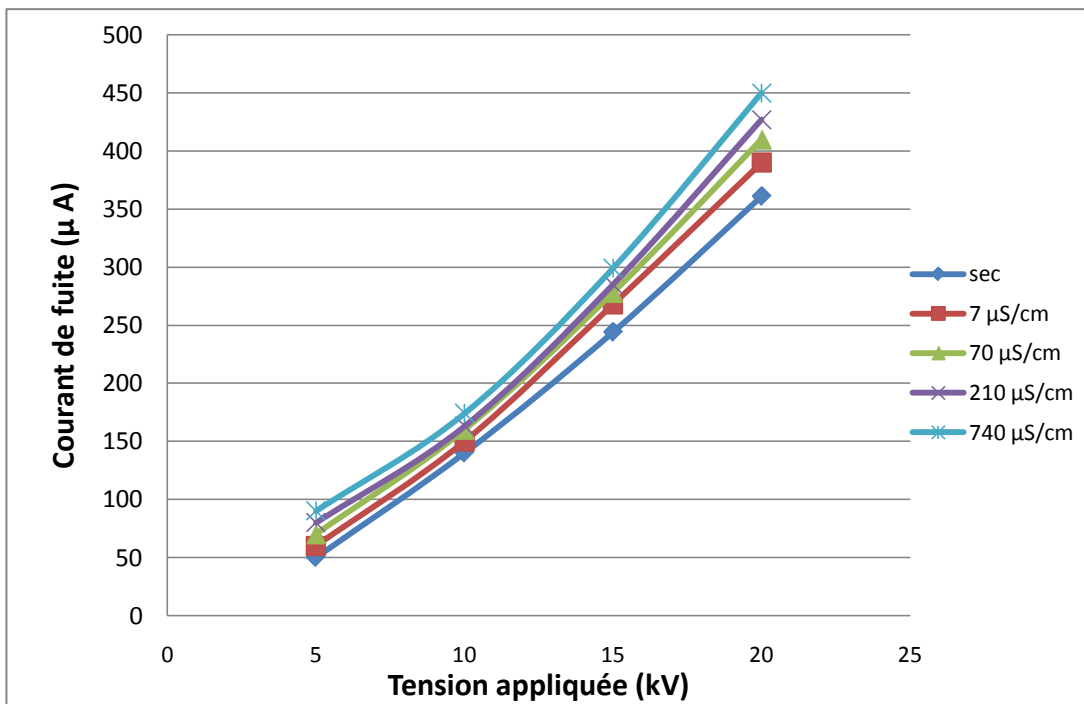


Figure III.16 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée dans le cas d'un isolateur 175 CTV

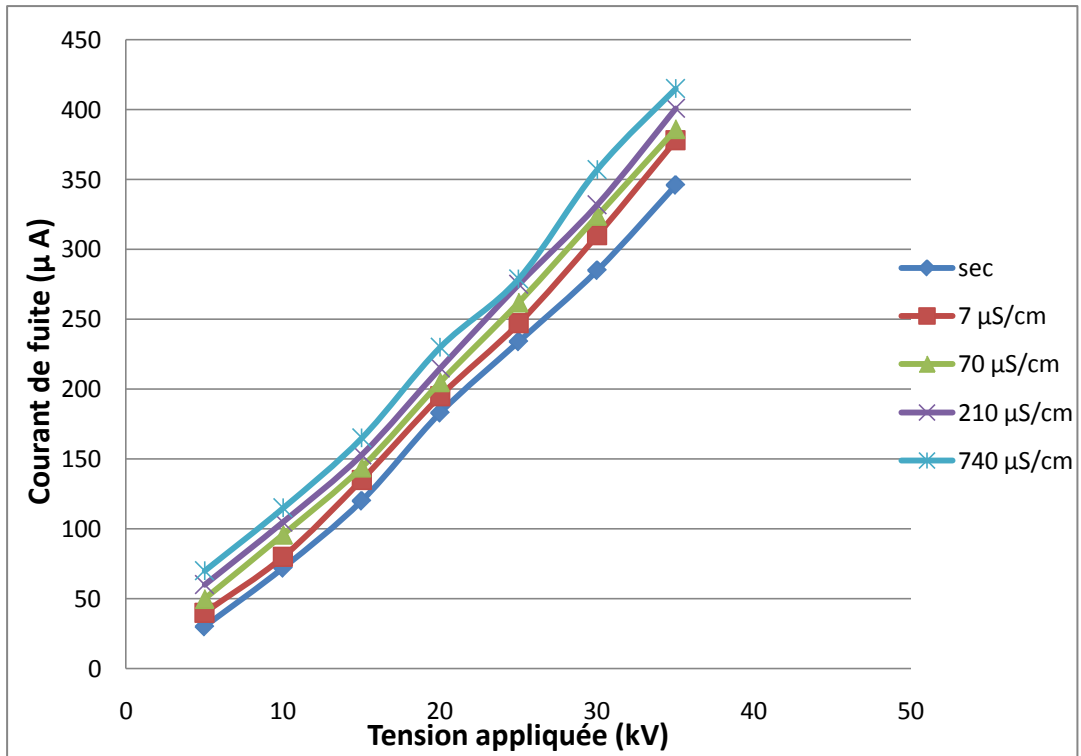


Figure III.17 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée dans le cas de deux isolateurs 175 CTV

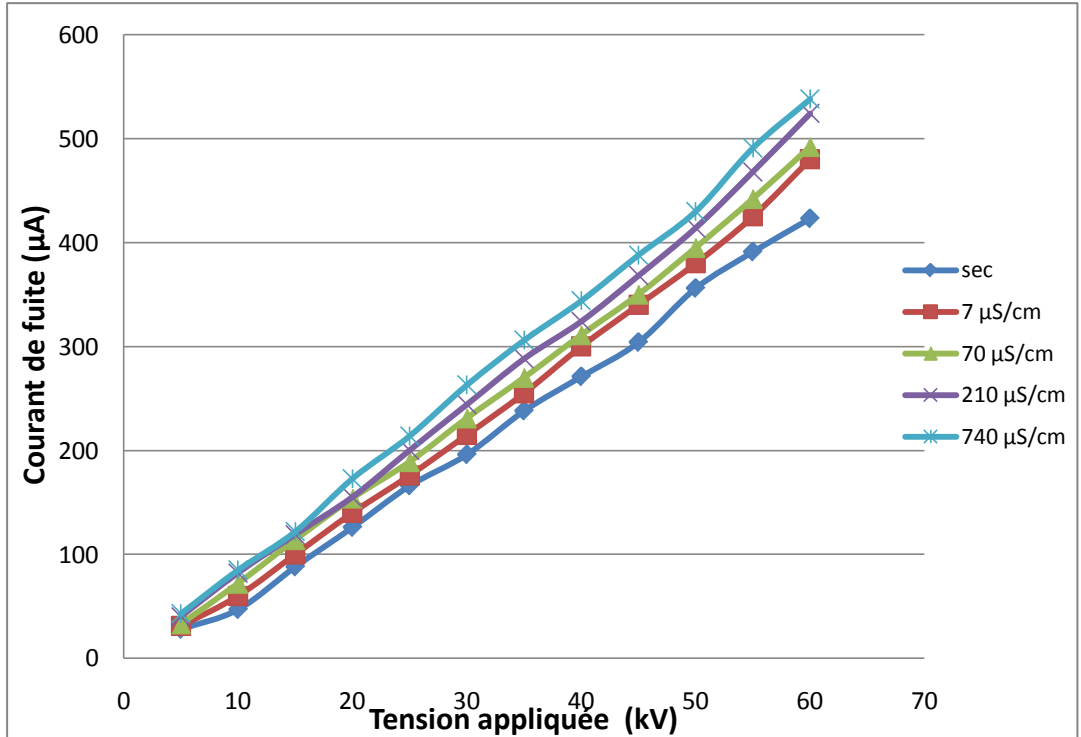
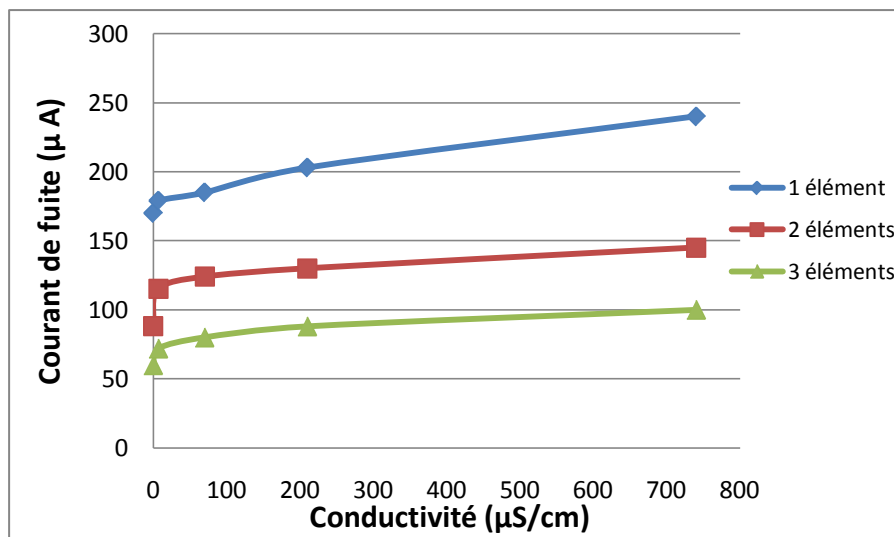


Figure III.18 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée dans le cas de trois isolateurs 175 CTV

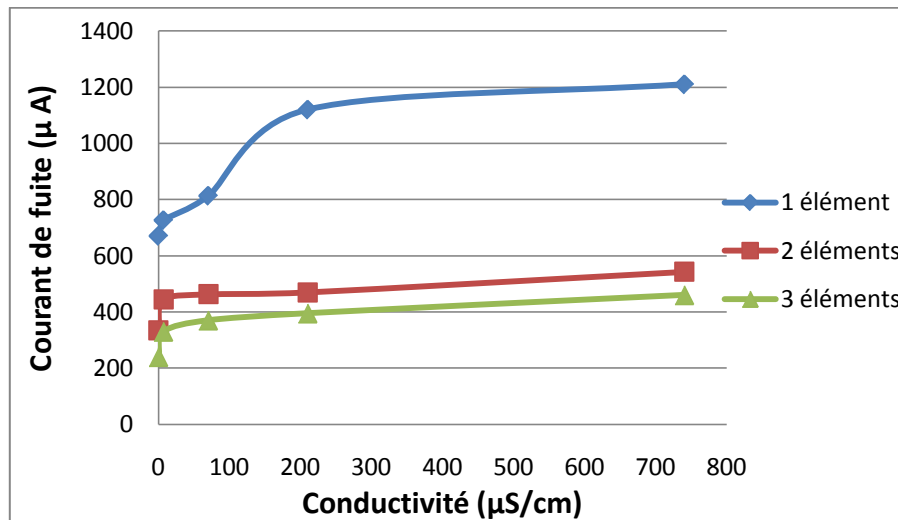
D'après ces figures, nous remarquons que quel que soit le nombre d'éléments employés, le courant de fuite augmente quasi linéairement avec la tension appliquée pour toutes les conductivités. Ceci est valable aussi bien pour l'isolateur 1512L, que pour 175 CTV. Cette augmentation peut être assimilée à une droite dont la pente varie en fonction de la conductivité utilisée.

➤ **Influence de la conductivité**

Nous représentons aux figures III.19 et III.20, la variation du courant de fuite en fonction de la conductivité de la solution polluante, pour les deux isolateurs. Dans le but de limiter le nombre de caractéristiques à présenter, deux niveaux de tension ont été choisis: 10kV et 20kV.

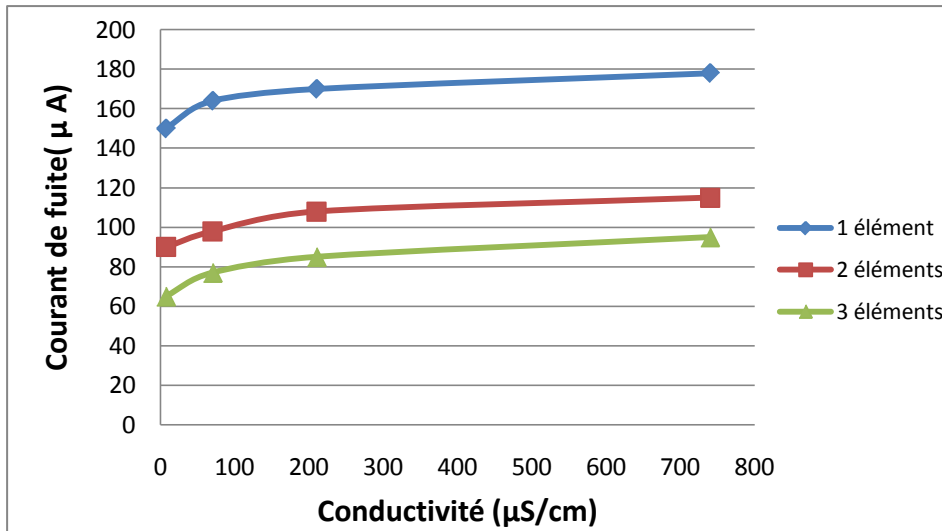


(a)

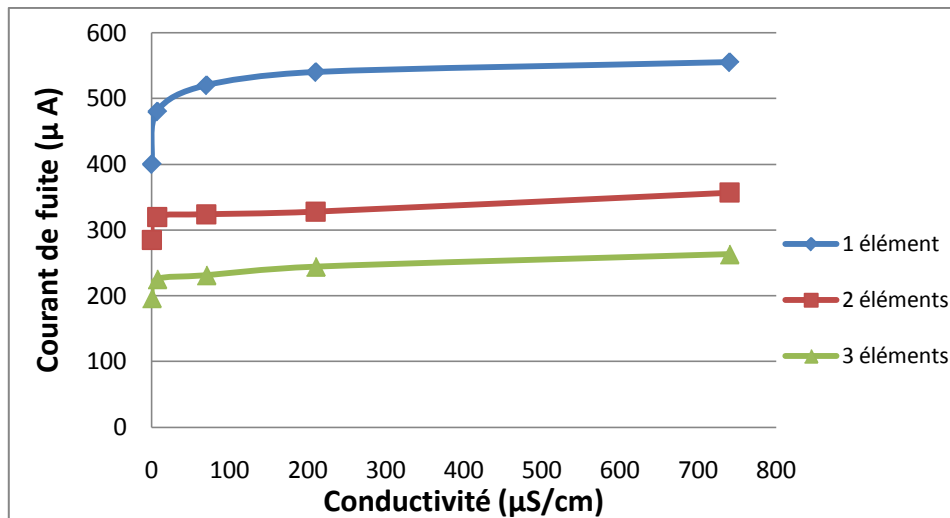


(b)

Figure III.19 : Courant de fuite en fonction de la conductivité cas de l'isolateur 1512L et une tension de : (a) U= 10kV, (b) U= 20kV



(a)



(b)

Figure III.20 : Courant de fuite en fonction de la conductivité cas de l'isolateur 175 CTV et une tension de : (a) $U= 10$ kV, (b) $U= 20$ kV

Avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante, nous remarquons que, pour un niveau de tension donné, le courant de fuite augmente rapidement pour les conductivités allant de 0 à 210 $\mu S/cm$ et lentement ailleurs. Ceci qui est valable pour les deux types d'isolateurs et pour n'importe quel nombre d'éléments.

Cette augmentation est interprétée par la diminution de l'impédance électrique équivalente de l'isolateur, vue des électrodes, quand la conductivité de la couche polluante augmente.

➤ **Influence du nombre d'éléments**

Dans le but d'examiner l'influence du nombre d'éléments utilisés dans les deux chaînes 1512L et 175 CTV sur le courant de fuite, nous avons tracé les figures III.21 et III.22. Nous avons pris comme exemple une tension de 20 kV.

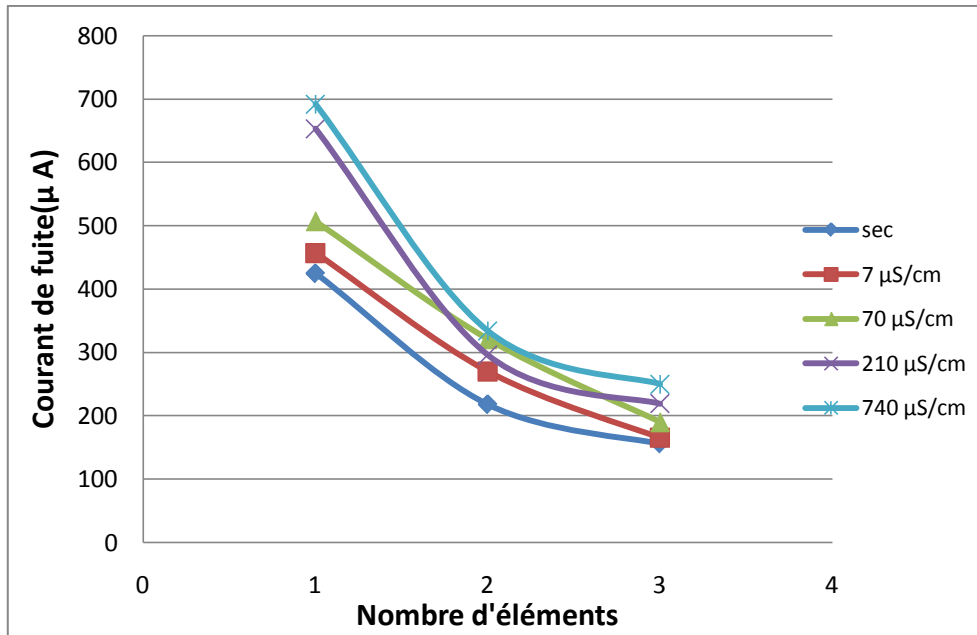


Figure III.21 : Courant de fuite en fonction du nombre d'isolateurs 1512L pour une tension de 20 kV

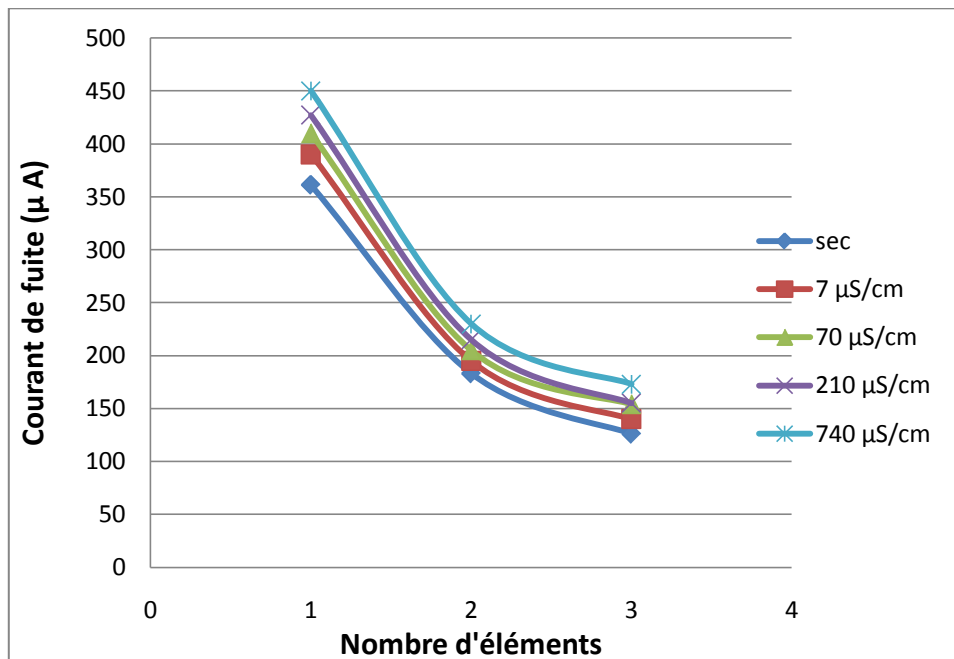


Figure III.22 : Courant de fuite en fonction du nombre d'isolateurs 175 CTV pour une tension de 20 kV

En comparant les caractéristiques obtenues dans les deux cas, nous pouvons déduire que, pour une tension et une conductivité données, l'amplitude du courant de fuite diminue avec l'augmentation du nombre d'isolateurs utilisés, ceci est valable aussi bien pour l'isolateur 1512L, que pour l'isolateur 175 CTV. Cette amplitude est plus grande dans le cas d'une chaîne à un élément, et plus faible pour une chaîne de trois éléments.

Ceci peut être justifié par l'effet de la distance inter-électrodes qui, en augmentant, fait augmenter l'impédance apparente, ce qui conduit à la diminution du courant de fuite.

En plus, le courant à une nature capacitive, vu le déphasage entre le courant et la tension (90°). Ceci peut être justifié par la quantité de charges induites sur le conducteur. Il est certain que si on augmente la distance inter-électrodes, les charges induites sur la surface totale de chaque électrode, pour une tension donnée, diminue.

➤ **Effet du profil de l'isolateur**

Afin d'examiner l'influence du type de l'isolateur utilisé sur le courant de fuite, nous avons comparé le courant de fuite des deux profils d'isolateurs 1512L et 175 CTV, cas d'un, deux et trois éléments. Pour ce faire, nous avons choisi une conductivité de $210 \mu\text{S}/\text{cm}$ et une tension de 20kV . Les résultats ainsi obtenus sont représentés sur la figure III.23

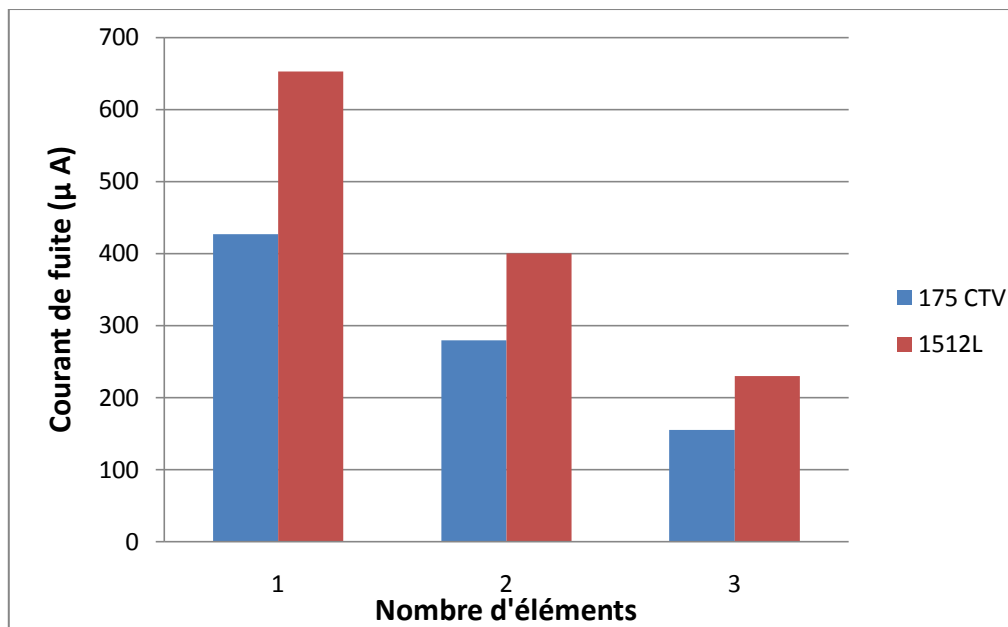


Figure III.23 : Influence du profil de l'isolateur sur le courant de fuite pour une conductivité de $210 \mu\text{S}/\text{cm}$ et une tension de 20 kV

En analysant ces histogrammes, nous notons que le courant de fuite est toujours plus élevé dans le cas de l'isolateur 1512L et ce quel que soit le nombre d'isolateurs dans la chaîne. Ceci est probablement dû à la taille des capôts des deux isolateurs, le 1512L ayant un capôt plus grand.

III.8.3 Impédance électrique et capacité équivalentes

Etant donné la variation linéaire du courant de fuite en fonction de la tension, nous pouvons déterminer, pour chaque conductivité, l'impédance électrique équivalente Z représentant l'inverse de la pente courant-tension. Vu que le courant de fuite est en avance sur la tension de pratiquement 90° , nous sommes en mesure de déterminer la capacité du système isolant puisque $Z = \frac{1}{c\omega}$. Les figures III.24 et III.25 montrent la variation de l'impédance électrique équivalente en fonction de la conductivité pour les deux profils des isolateurs. Par ailleurs, les figures III.26 et III.27 illustrent, pour les deux profils, la variation de la capacité équivalente en fonction de la conductivité.

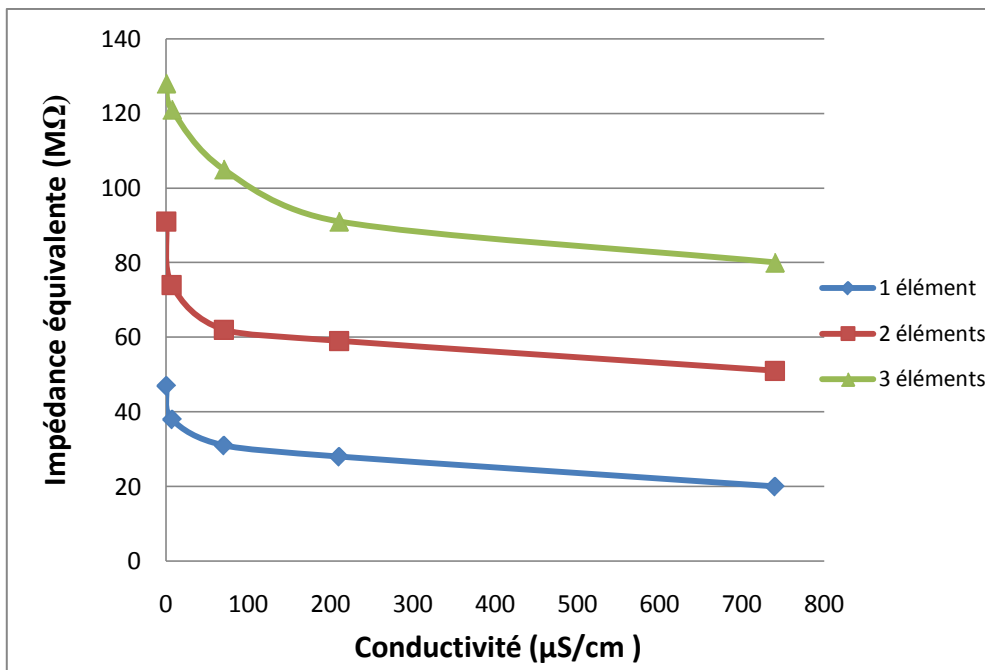


Figure III.24: Impédance équivalente en fonction de la conductivité cas de l'isolateur 1512 L

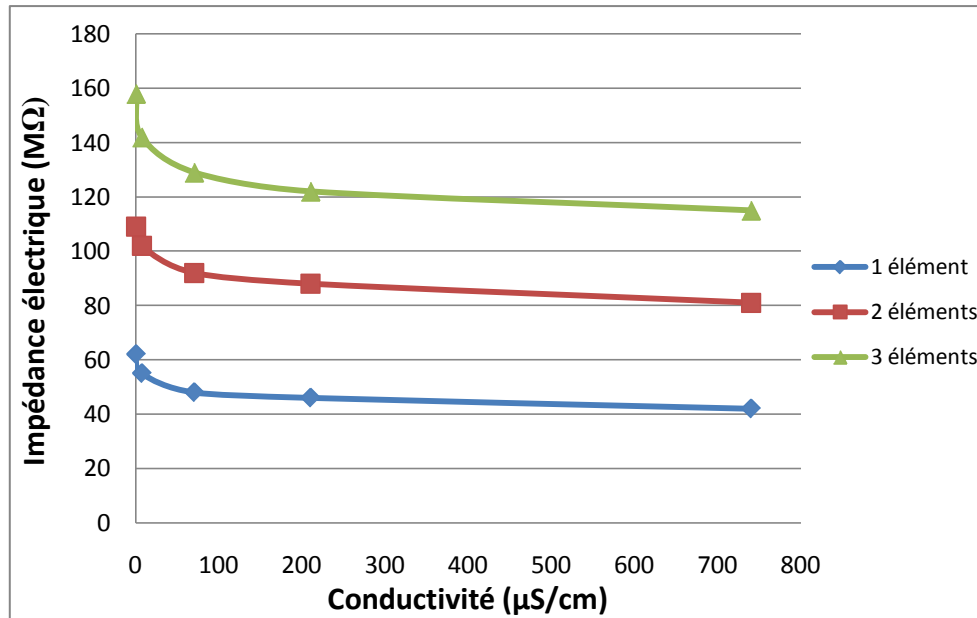


Figure III.25 : Impédance équivalente en fonction de la conductivité
cas de l'isolateur 175 CTV

Pour un nombre donné d'isolateurs 1512L et 175 CTV, nous constatons, d'après ces figures, que l'impédance équivalente diminue avec l'accroissement de la conductivité de la couche polluante. Cette diminution est brusque pour les conductivités comprises entre 0 et $210\mu\text{S/cm}$, et lente ailleurs. La valeur de cette impédance tend par la suite, vers une valeur limite.

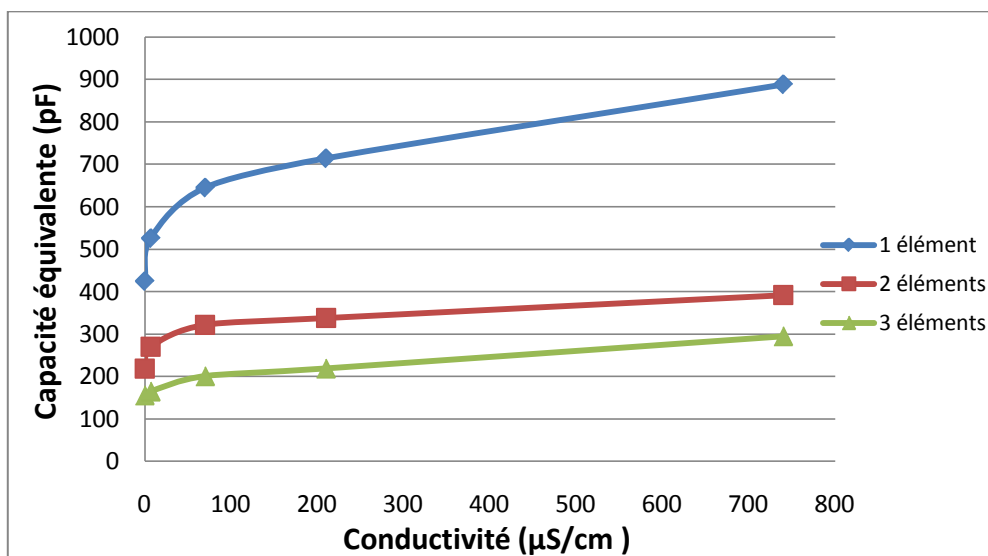


Figure III.26 : Capacité équivalente en fonction de la conductivité
cas de l'isolateur 1512 L

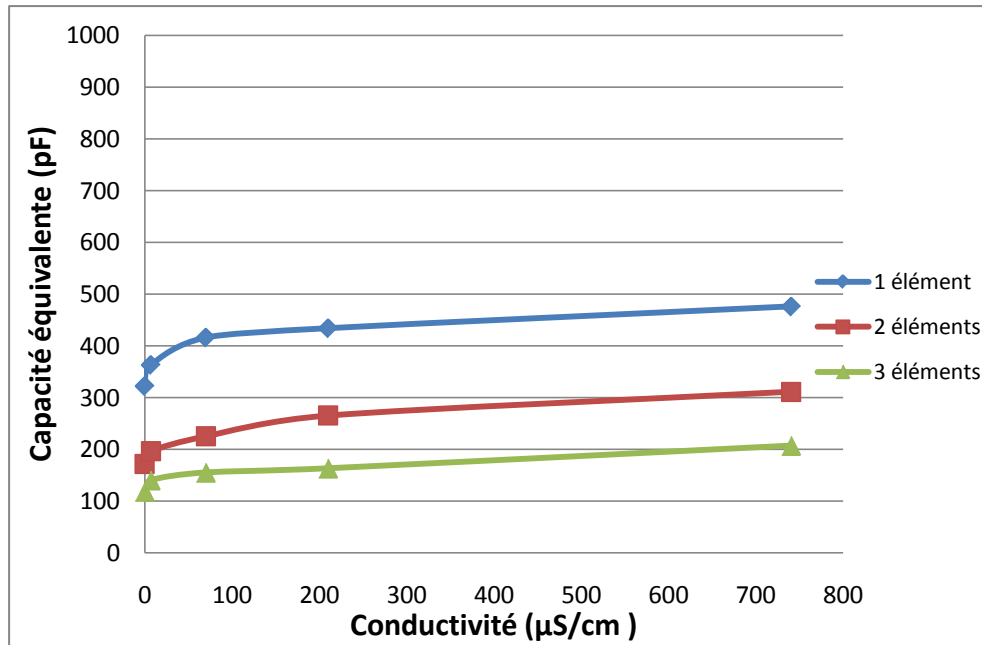


Figure III.27 : Capacité équivalente en fonction de la conductivité
cas de l'isolateur 175 CTV

En se basant sur ces figures, nous remarquons également que, pour un nombre donné d'isolateurs 1512L et 175 CTV, la capacité équivalente possède une allure inversée par rapport à celle de l'impédance équivalente. Ce qui est évident vu la relation qui les relie. La valeur de la capacité augmente en fonction de la conductivité de la couche polluante. Cette augmentation est rapide pour les conductivités comprise entre 0 et $210\mu\text{S/cm}$, et lente ailleurs. La valeur de la capacité quant à elle, tend vers une valeur finie.

III.8.4 Charge électrique

Nous avons visualisé simultanément la tension aux bornes de la capacité de mesure, qui représente l'image de la charge, et la tension appliquée (Figure III.28 et III.29). Les deux courbes possèdent pratiquement la même allure. Ceci est prévisible, car la charge est proportionnelle à la tension. Le coefficient de proportionnalité étant la capacité du système ($Q=C.V$). Cependant, un très léger déphasage est observé. Nous remarquons aussi, l'existence d'harmoniques et des pics de charges de durée de vie très courtes. Nous observons aussi des déformations aux niveaux des valeurs crête de la charge qui augmentent avec la tension appliquée.

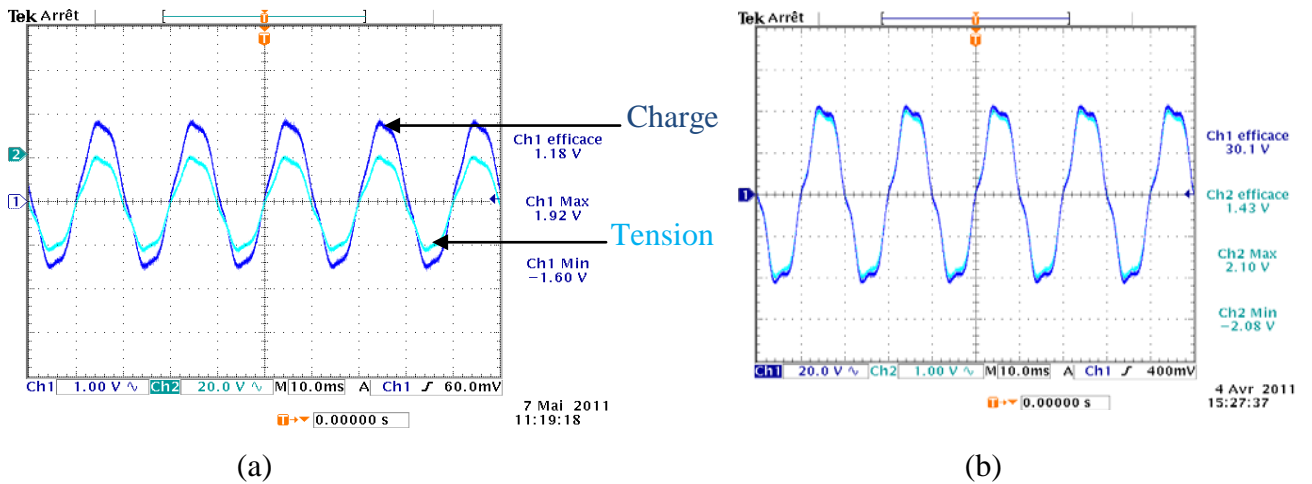


Figure III.28 : Formes des signaux de la tension appliquée et de la charge pour le cas de l'isolateur 1512L avec une conductivité de $70 \mu\text{S}/\text{cm}$ et une tension de, (a) 10kV, (b) 20kV

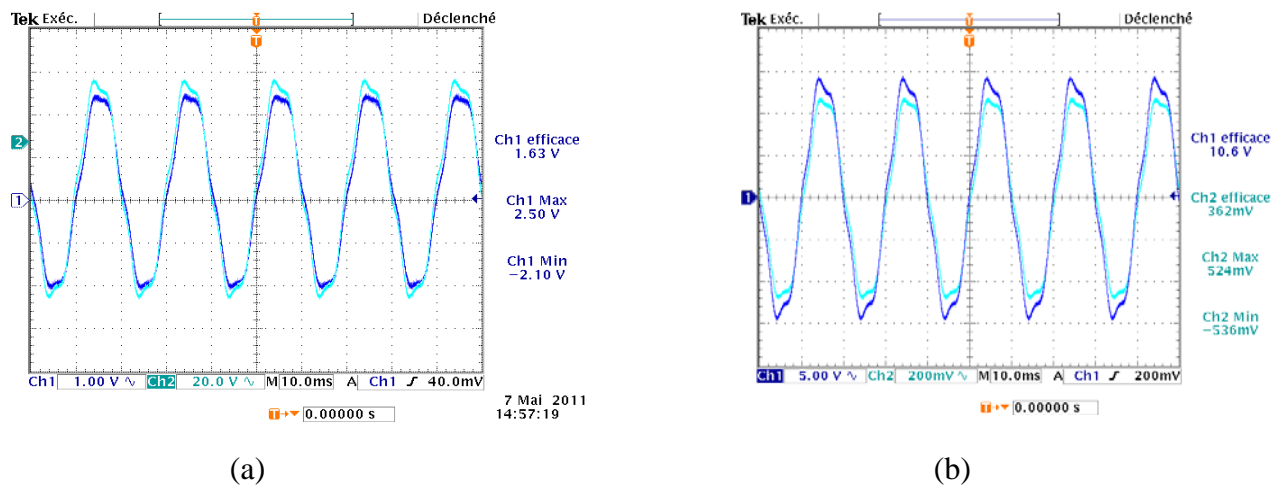


Figure III.29 : Formes des signaux de la tension appliquée et de la charge pour le cas de l'isolateur 175 CTV avec une conductivité de $70 \mu\text{S}/\text{cm}$ et une tension de, (a) 10kV, (b) 20kV

Dans cette partie, nous avons examiné l'impact de la tension appliquée, de la conductivité de la couche polluante, du nombre d'isolateurs et du profil de l'isolateur sur la charge électrique.

➤ **Effet de la tension appliquée**

Pour chaque cas, la charge a été mesurée pour des niveaux de tension choisis inférieurs à 50% de la tension de contournement. Les figures (III.30) à (III.35) représentent la variation de la charge en fonction de la tension appliquée pour les différentes conductivités.

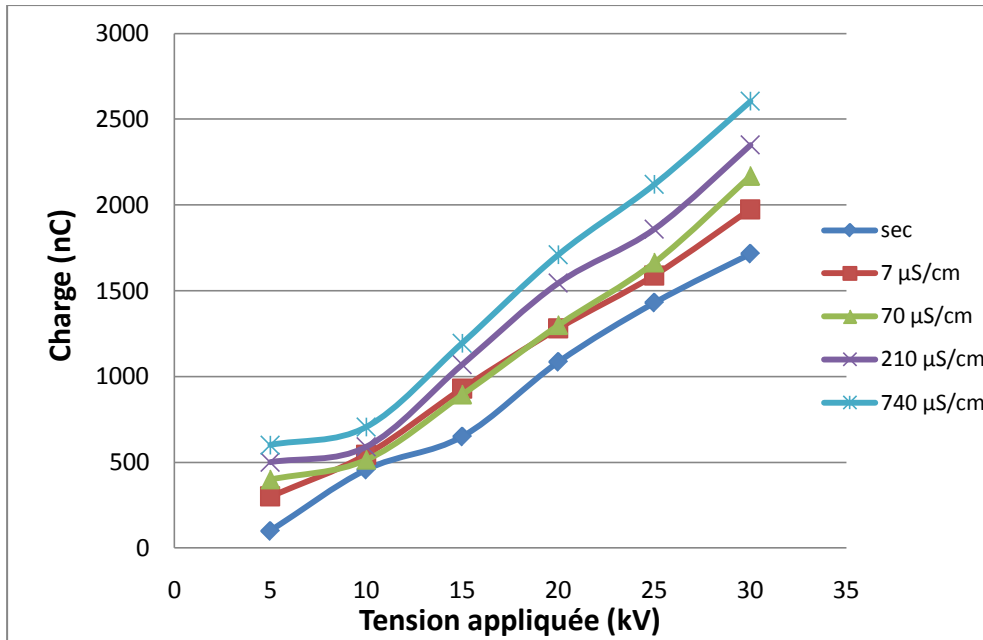


Figure III.30 : Charge en fonction de la tension appliquée dans le cas d'un isolateur 1512L

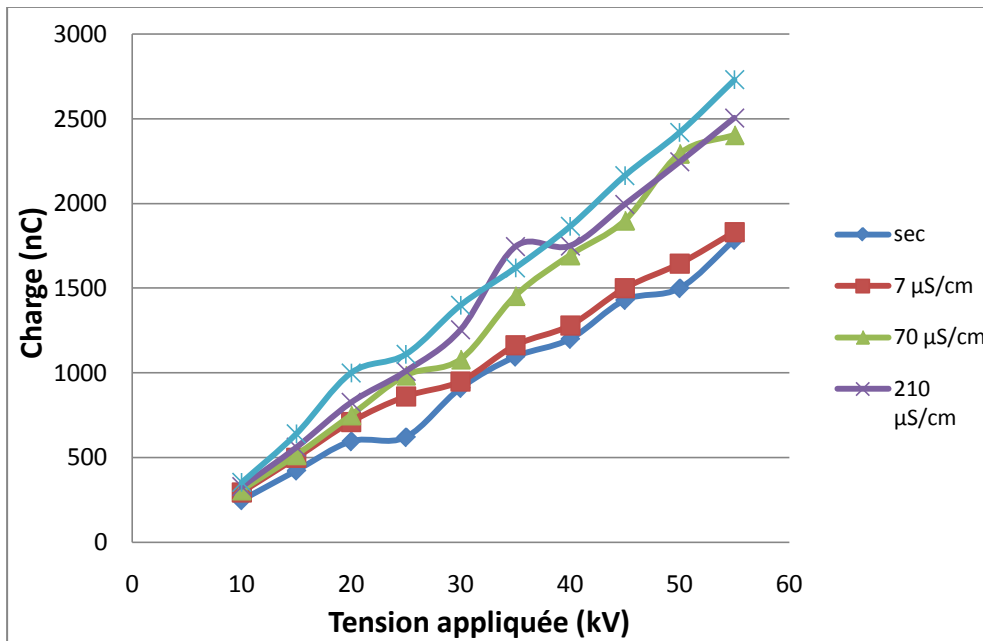


Figure III.31 : Charge en fonction de la tension appliquée dans le cas de deux isolateurs 1512 L

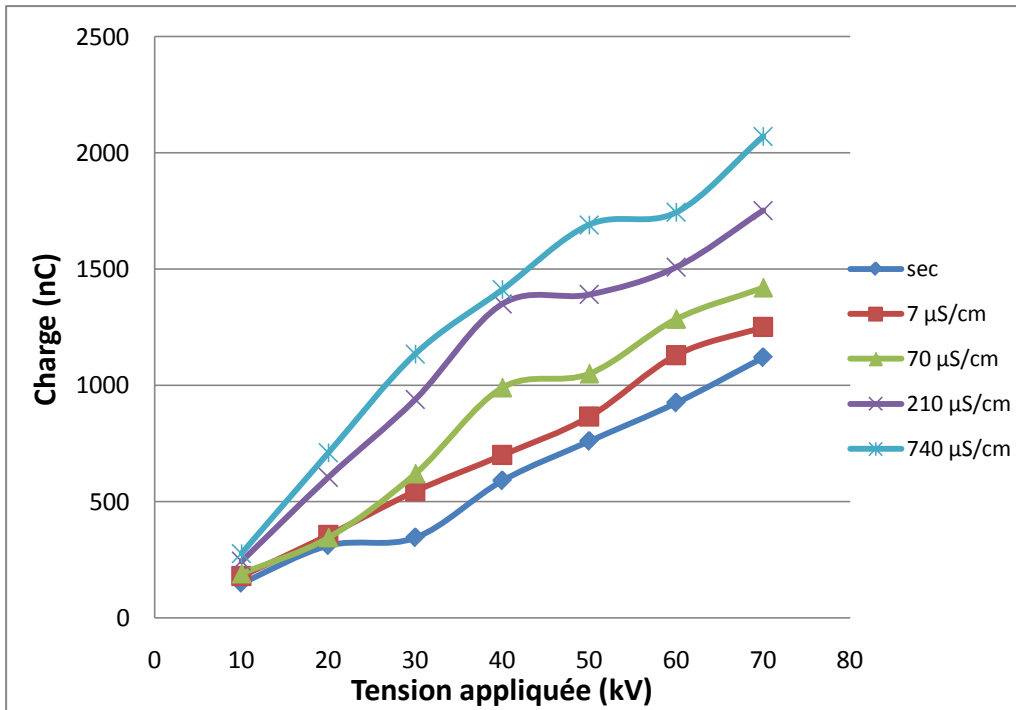


Figure III.32 : Charge en fonction de la tension appliquée dans le cas de trois isolateurs 1512 L

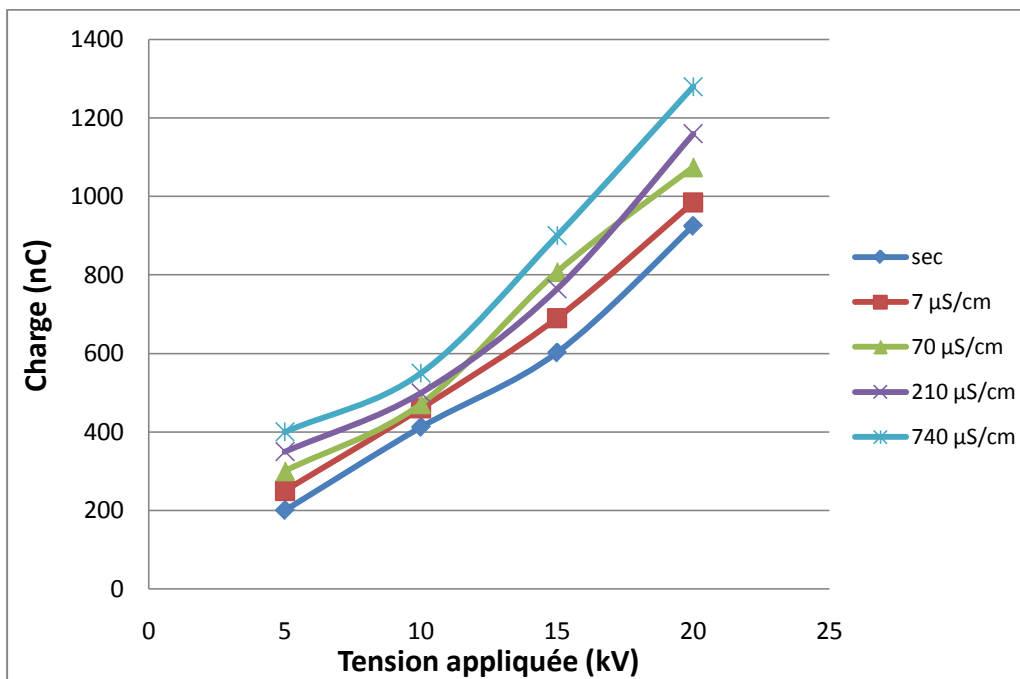


Figure III.33 : Charge en fonction de la tension appliquée dans le cas d'un isolateur 175 CTV

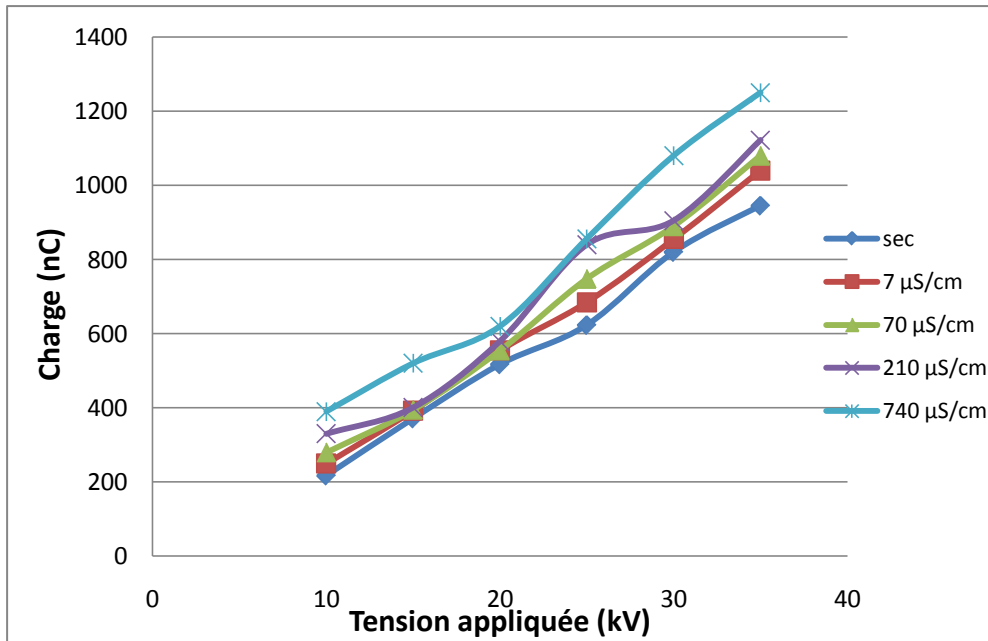


Figure III.34 : Charge en fonction de la tension appliquée dans le cas de deux isolateurs 175 CTV

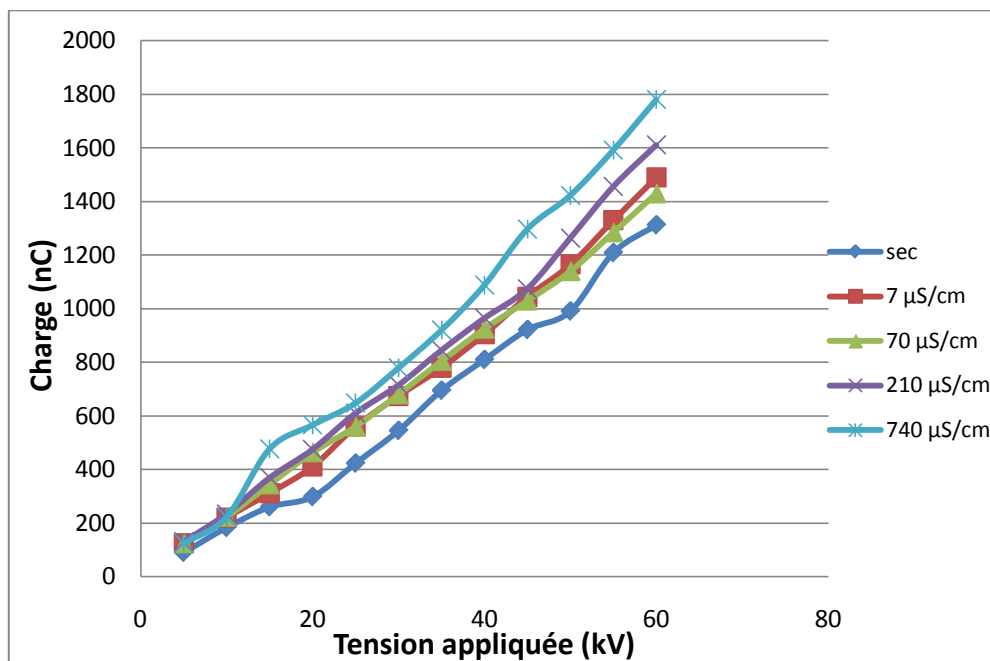
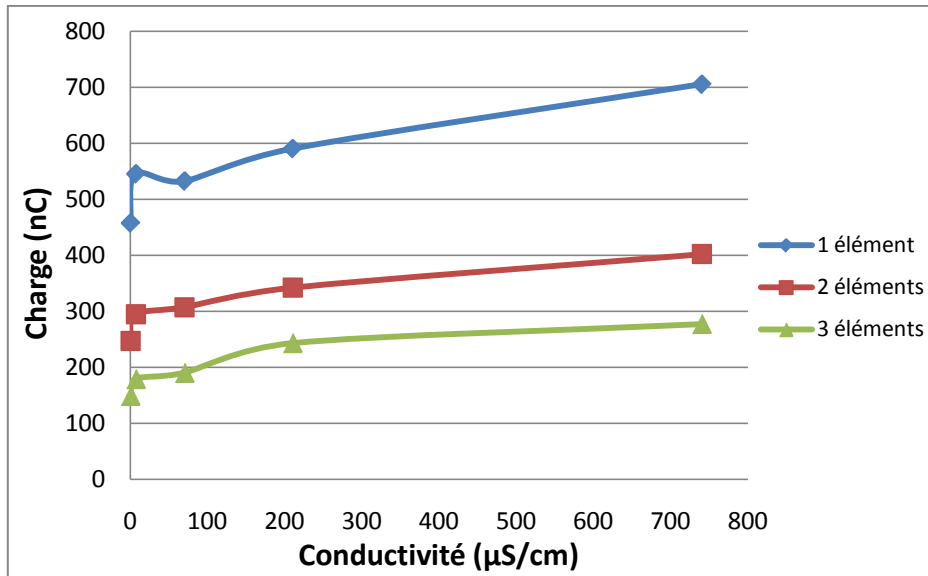


Figure III.35 : Charge en fonction de la tension appliquée dans le cas de trois isolateurs 175 CTV

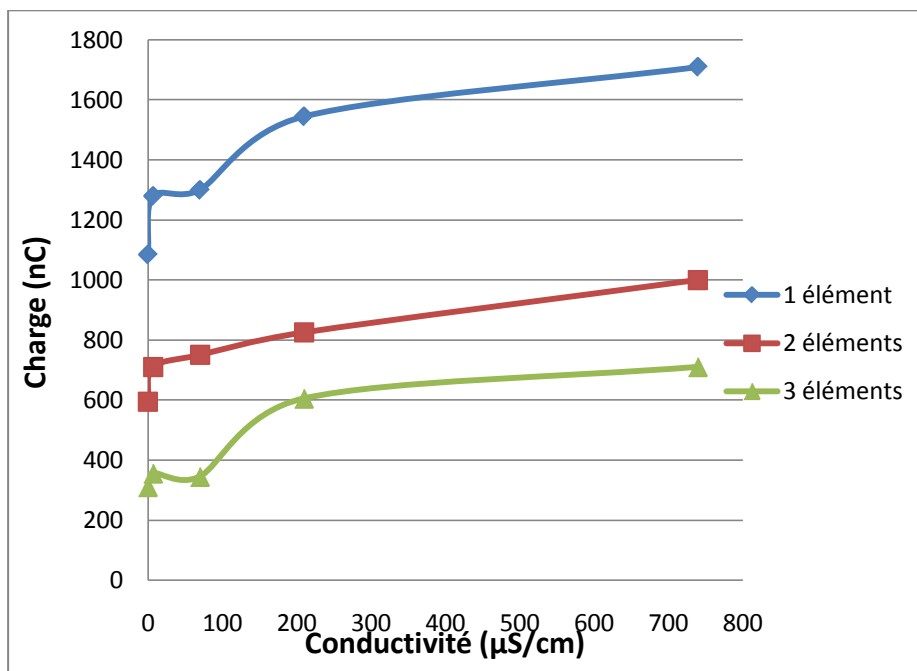
D'après ces figures et pour un profil d'isolateur donné, nous remarquons que, quel que soit le nombre d'éléments employés, la charge croît avec la tension appliquée, et ce pour toutes les conductivités.

➤ **Effet de la conductivité**

Nous représentons aux figures III.36 et III.37 suivantes, la variation de la charge en fonction de la conductivité de la solution saline, pour les deux profils d'isolateurs lorsque un, deux et trois éléments sont utilisés. Dans le but de limiter le nombre de caractéristiques à présenter, deux niveaux de tension ont été choisis: 10kV et 20kV.



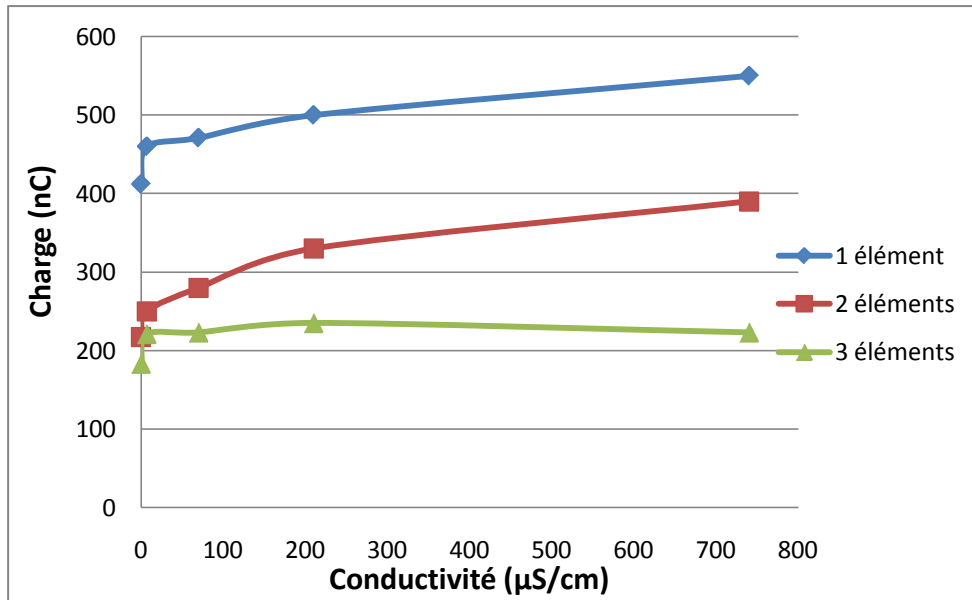
(a)



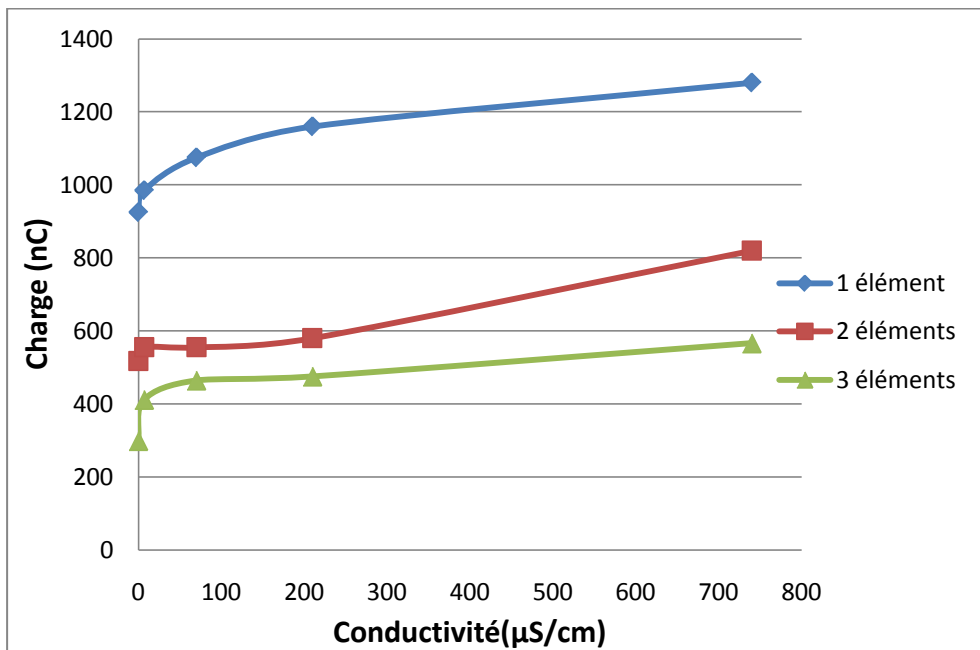
(b)

Figure III.36 : Charge en fonction de la conductivité cas de l'isolateur 1512L

et une tension de : (a) 10 kV, (b) 20 kV



(a)



(b)

Figure III.37 : Charge en fonction de la conductivité cas de l'isolateur 175 CTV et une tension de : (a) 10 kV, (b) 20 kV

Nous remarquons que, pour un niveau de tension donné, la charge augmente avec la conductivité de la couche polluante. Ceci est valable pour les deux types d'isolateurs et pour n'importe quel nombre d'éléments.

Cette augmentation est interprétée par la diminution de l'impédance électrique équivalente de l'isolateur, et donc, par l'augmentation de la capacité équivalente vue des électrodes, avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante.

➤ **Influence du nombre d'éléments**

Afin d'examiner l'influence du nombre d'isolateurs 1512L et 175 CTV utilisés sur la charge, nous avons tracé les figures III.38 et III.39 suivantes. Pour cela nous avons pris une tension de 20 kV comme exemple.

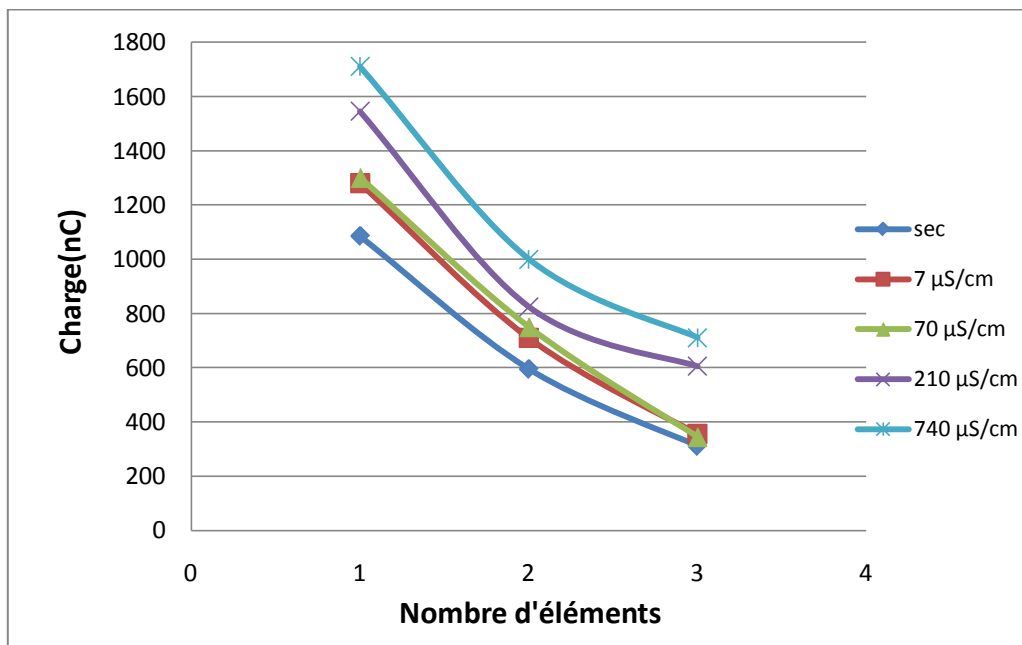


Figure III.38 : Charge en fonction du nombre d'isolateurs 1512L et une tension de 20 kV

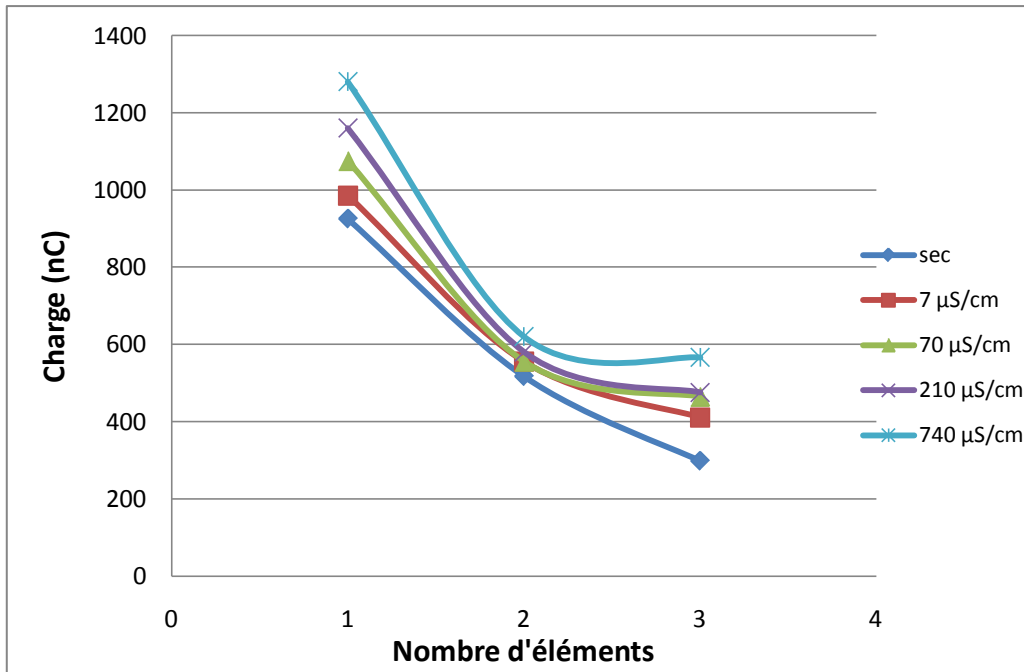


Figure III.39 : Charge en fonction du nombre d'isolateurs 175 CTV pour une tension de 20 kV

Pour une tension et une conductivité données, la charge diminue avec l'augmentation du nombre d'isolateurs 1512L ou 175 CTV. Ceci peut être justifié par l'effet de la distance entre électrodes qui, en augmentant, entraîne l'augmentation de l'impédance apparente, et par conséquent, la diminution de la capacité apparente du système, ce qui conduit à la diminution de la charge.

➤ **Effet du profil d'isolateurs**

Pour une tension de 20 kV et une conductivité de 210 µS/cm, l'histogramme présenté dans la figure III.40, illustre la variation de la charge en fonction du profil des isolateurs (1512L et 175 CTV), lorsqu'un, deux ou trois éléments sont utilisés

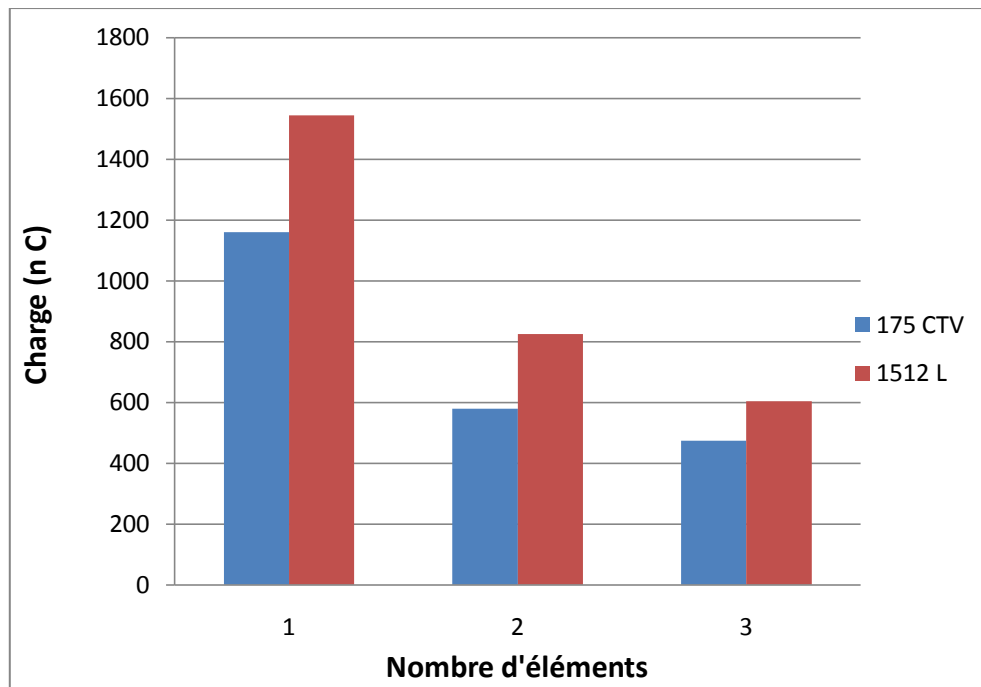


Figure III.40 : Influence du profil de l'isolateur sur la charge pour une conductivité de 210 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et une tension de 20 kV

Dans ces conditions et quel que soit le nombre d'éléments, la charge, est toujours plus élevée dans le cas de l'isolateur 1512L. Tout comme le courant de fuite, Ceci est probablement dû à la taille des capôts des deux isolateurs, le 1512L ayant un capôt plus grand.

III.8.5 Energie du système

Connaissant la charge, nous pouvons déterminer l'énergie W puisque $W = \frac{1}{2} Q \cdot V$. L'évolution de cette dernière a été suivie en fonction de la tension appliquée et de la conductivité de la pollution.

➤ Influence de la tension appliquée et de la conductivité

La figure III.41 montre l'évolution de l'énergie en fonction de la tension appliquée, pour la chaîne de trois isolateurs 1512L et 175 CTV et une conductivité de 210 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

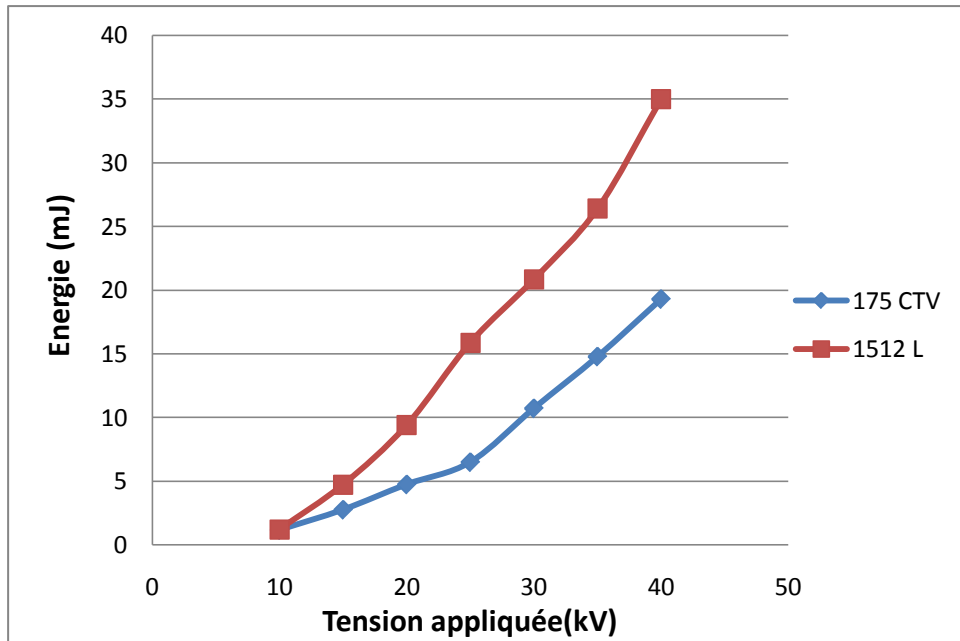


Figure III.41 : Energie du système pour les deux chaînes d'isolateurs à trois éléments en fonction de la tension appliquée.

Les caractéristiques présentées aux figures III.42 et III.43, illustrent, pour une tension de 20kV, l'évolution de l'énergie du système en fonction de la conductivité, pour les deux chaînes d'isolateurs, ayant un, deux et trois éléments.

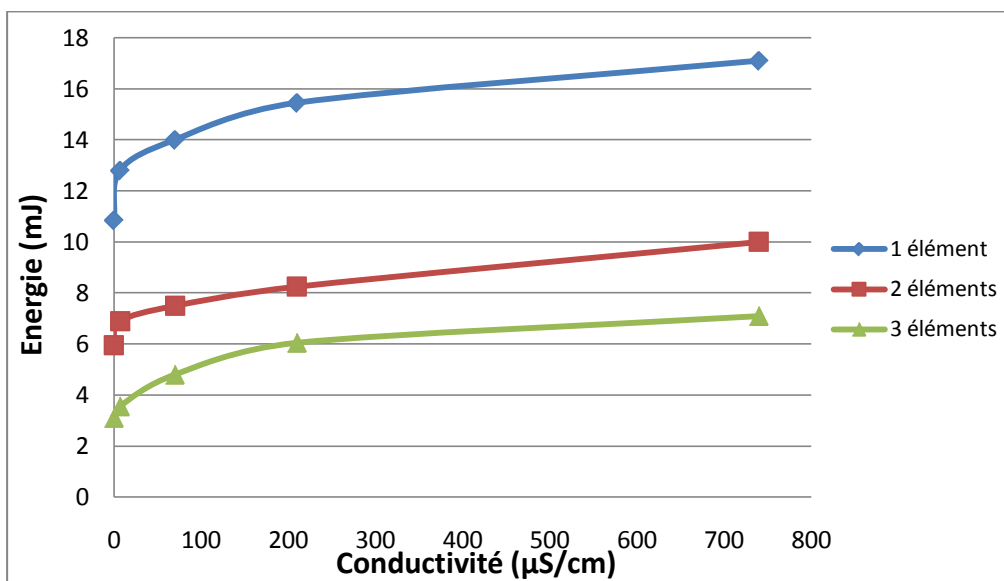


Figure III.42 : Energie de l'isolateur 1512L en fonction de la conductivité

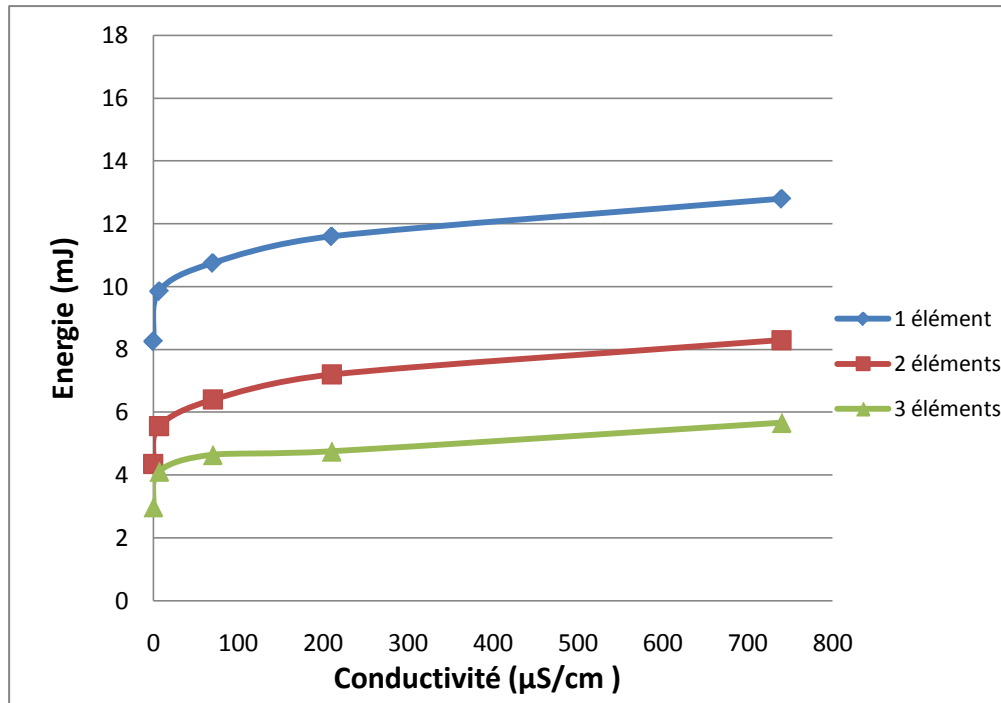


Figure III.43 : Energie de l'isolateur 175 CTV en fonction de la conductivité

Nous remarquons que l'énergie du système dépend des deux paramètres : la tension appliquée et la conductivité de la couche polluante. Cette énergie augmente avec la tension appliquée et la conductivité. L'augmentation est très rapide en fonction de la tension appliquée. Cependant, elle est moins accentuée en fonction de la conductivité. Dans cette dernière caractéristique, la valeur de l'énergie tend vers une valeur finie. En effet l'énergie est plus sensible à la variation de la tension qu'à celle de la conductivité.

III.9 Conclusion

Il ressort de cette étude expérimentale, les principales conclusions suivantes :

- La tension de contournement diminue avec l'augmentation de la conductivité, et augmente avec le nombre d'isolateurs dans une chaîne. Pour une même conductivité, l'isolateur 1512L, possédant une longueur de fuite plus grande, est plus rigide que le 175 CTV.
- Le courant de fuite augmente avec la tension appliquée et la conductivité de la couche polluante, et diminue avec l'augmentation du nombre d'isolateurs utilisés dans une chaîne. L'isolateur 1512 L possède des valeurs du courant de fuite supérieures à celles de l'isolateur 175 CTV.

- L'augmentation de la conductivité a pour effet la diminution de l'impédance électrique équivalente vue des électrodes, et par conséquence l'accroissement de la capacité équivalente du système.
- La charge croît avec la tension appliquée et la conductivité de la solution saline. Elle diminue avec l'augmentation du nombre d'isolateurs utilisés dans une chaîne. L'isolateur 1512L présente des valeurs de la charge supérieures à celles du 175 CTV. Par ailleurs, l'énergie du système augmente beaucoup plus avec la tension appliquée qu'avec la conductivité.

Chapitre IV

Méthodes numériques de calcul du potentiel et du champ électriques

IV.1 Introduction

La détermination de la distribution du champ et du potentiel électriques de tout système de haute tension, est un problème de calcul complexe, non pas par la complexité des équations aux dérivées partielles qui les décrivent, mais plutôt, à cause de la forme irrégulière des diélectriques, de la proximité de surfaces métalliques aux formes complexes, des lignes de transmission, et dans certains cas, de la présence d'une couche conductrice.

Pour remédier à ce problème, des méthodes de calculs ont été développées. Ces méthodes peuvent être classées en deux groupes : les méthodes numériques et les méthodes analogiques. Ces dernières ne sont plus utilisées de nos jours, car elles sont peu commodes et inadéquates pour les problèmes à trois dimensions [42]. Les méthodes numériques sont essentiellement de type différences finies, éléments finis, charges équivalentes et éléments finis de frontières. Ces méthodes, dont le principe et les caractéristiques sont développés dans ce chapitre, sont basées sur la résolution de l'équation de Laplace en imposant les conditions aux frontières adaptées à chaque problème.

Dans ce chapitre, nous rappelons d'abord le modèle de Maxwell, les différentes formulations et les équations qui en résultent. Nous évoquons, par la suite, chaque méthode numérique à part, en citant leurs avantages et leurs inconvénients.

IV.2 Equations de Maxwell

Les équations qui gouvernent la répartition du potentiel et du champ électriques, dans un milieu donné, dérivent des équations de Maxwell. Celles-ci sont formées par quatre équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques caractérisés par le champ magnétique \vec{H} et l'induction magnétique \vec{B} aux phénomènes électriques caractérisés par le champ électrique \vec{E} et l'induction électrique \vec{D} . Ces quatre équations sont :

$$\vec{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho_v \quad (\text{IV.2})$$

$$\vec{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{IV.3})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{IV.4})$$

avec ρ_v la densité volumique de charges et \vec{J} est le vecteur densité de courant.

Outre ces quatre équations, il y a les relations constitutives qui lient \vec{D} à \vec{E} , \vec{J} à \vec{E} et \vec{B} à \vec{H} :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{IV.5})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{IV.6})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{IV.7})$$

où ϵ , μ , et σ représentent respectivement la permittivité électrique, la susceptibilité magnétique, et la conductivité électrique du milieu.

Lorsque l'on applique une différence de potentiel alternative, la dérivation des grandeurs électriques par rapport au temps, revient à les multiplier par la quantité $j\omega$ où j est l'unité imaginaire et ω la pulsation de la source. En tenant compte des relations constitutives, les équations (IV. 1) et (IV.3) deviennent :

$$\vec{\text{rot}} \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H} \quad (\text{IV.8})$$

$$\text{div} (\epsilon \vec{E}) = \rho_v \quad (\text{IV.9})$$

$$\vec{\text{rot}} \vec{H} = \sigma \vec{E} + j\omega \epsilon \vec{E} \quad (\text{IV.10})$$

Comme le champ magnétique est faible, dans les équipements HT considérés, le second membre de l'équation (IV.8) peut être négligé, ce qui donne :

$$\vec{\text{rot}}\vec{E}=0 \quad (\text{IV.11})$$

On peut donc découpler les équations (IV.9) et (IV. 11) qui gouvernent les grandeurs électriques de celles qui gèrent les grandeurs magnétiques. L'équation (IV.9) n'est alors rien d'autre que la forme locale du théorème de Gauss qui traduit la conservation de la charge. L'équation (IV. 11) permet de dire que le champ \vec{E} dérive d'un potentiel ϕ avec :

$$\vec{E} = -\vec{\text{grad}} \phi \quad (\text{IV.12})$$

L'introduction de la relation (IV. 12) dans l'équation (IV.9) donne :

$$\text{div}(-\varepsilon \vec{\text{grad}} \phi) = \rho_v \quad (\text{IV.13})$$

On obtient ainsi l'équation qui gouverne la répartition du potentiel dans un milieu de permittivité absolue ε avec une densité de charge volumique de charge ρ_v .

Pour des matériaux isolants, généralement utilisés dans les appareillages HT, la densité volumique de charge ρ_v est nulle. Avec ces hypothèses, on obtient l'équation de Laplace (IV. 14) qui gouverne la répartition du potentiel dans les matériaux isolants :

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (\text{IV.14})$$

On peut noter que cette équation gouverne aussi la répartition du potentiel dans les matériaux conducteurs tels que les électrodes, car ceux-ci sont des volumes équipotentiels.

IV.3 Conditions aux limites

Il existe plusieurs solutions aux équations différentielles précédemment définies. Les conditions aux limites servent, en fait, à déterminer une solution unique de ces équations.

Ces conditions sont principalement de deux types : la condition de Dirichlet et celle de Neumann. La condition de Dirichlet impose la valeur du potentiel comme par exemple les surfaces des conducteurs, les surfaces équipotentiels, ou les limites infinies du domaine d'étude. La condition de Neumann impose la valeur de la dérivée normale du potentiel tel les plans de symétrie ou les surfaces à flux imposé. Les conditions de Dirichlet et de Neumann sont dites homogènes, si les valeurs imposées sont nulles. Elles sont dites non homogènes dans le cas contraire [40].

IV.4 Conditions d'interfaces

Les équations de Maxwell permettent de déterminer la manière dont les champs se conservent (ou non) à l'interface de deux milieux présentant des propriétés diélectriques ou magnétiques différentes. Il est alors d'usage de décomposer le champ électrique (ou magnétique) en deux composantes particulières : l'une tangente à la surface de séparation et l'autre normale à cette même surface.

Ce procédé a permis de dégager des résultats importants à propos des conditions aux limites à la surface de séparation des deux milieux. Ces résultats concernent les composantes tangentielles et normales, à la surface de séparation du champ électromagnétique. L'équation (IV. 14) a été obtenue en émettant l'hypothèse que la permittivité absolue ϵ est constante sur tout le domaine d'étude. Cette équation n'est donc valable que pour des milieux homogènes et isotropes. Dans le cas où plusieurs milieux coexistent, ce qui est généralement le cas dans les problèmes HT, l'équation (IV. 14) n'est plus vraie dans l'ensemble du domaine d'étude. Il faut alors chercher une solution dans chaque milieu et lier les différentes solutions par des conditions d'interfaces. Pour les établir, on utilise la forme intégrale des équations de Maxwell en régime statique.

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (IV.15)$$

$$\oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{s} \quad (IV.16)$$

$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \iiint_{\Omega} \rho \, dV \quad (IV.17)$$

$$\oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (IV.18)$$

Considérons l'interface S (Figure IV.1) entre deux milieux (M_1 et M_2) de propriétés physiques (ϵ_1, μ_1) et (ϵ_2, μ_2) . Appelons E_i , H_i et n_i le champ électrique, le champ magnétique et la normale dans le milieu i . Le produit scalaire et le produit vectoriel du champ avec la normale à l'interface, fournissent les composantes normales et tangentielles à l'interface relative au milieu considéré.

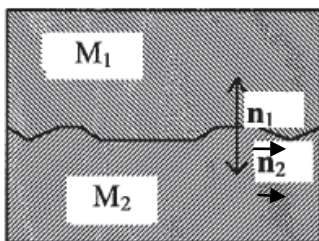


Figure IV.1 : Définition de l'interface

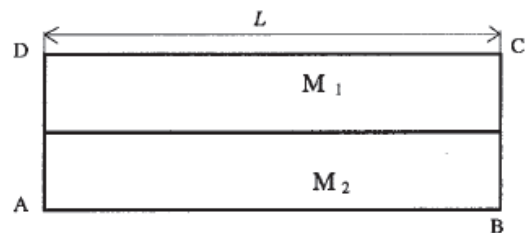


Figure IV.2 : Définition de l'élément de surface

Nous considérons un élément de surface ΔS délimité par le contour $L_0=ABCD$ (Figure IV.2). Nous supposons que les distances BC et DA sont suffisamment petites et on négligera la circulation des champs sur ces tronçons. Il ne reste plus que la circulation sur le segment L.

$$\oint_{L_0} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_L (\vec{n}_1 \vec{E}_1 + \vec{n}_2 \vec{E}_2) \quad (IV.19)$$

$$\oint_{L_0} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_L (\vec{n}_1 \vec{E}_1 + \vec{n}_2 \vec{E}_2) \quad (IV.20)$$

La densité de courant est composée de deux parties : densité volumique de courant J_v et la densité surfacique de courant J_s sur l'interface. Evaluons maintenant le flux J à travers l'élément de surface ΔS :

$$\iint_{\Delta S} \vec{J} \cdot d\vec{s} = \int_{\Delta S} (\vec{J}_v \cdot d\vec{s}) + \int_L (\vec{J}_v \cdot d\vec{l}) \quad (IV.21)$$

Les tronçons BC et DA sont faibles devant AB et CD. ds l'est également. Le premier terme du membre de droite de la relation (IV.21) peut être négligé. On a :

on aura donc :

$$\iint_{\Delta S} \vec{J} \cdot d\vec{s} = \int_L \vec{J}_s \cdot d\vec{l} \quad (IV.22)$$

$$\vec{n}_1 \vec{E}_1 + \vec{n}_2 \vec{E}_2 = 0 \quad (IV.23)$$

$$\vec{n}_1 \vec{H}_1 + \vec{n}_2 \vec{H}_2 = \vec{J}_s \quad (IV.24)$$

Ces deux équations traduisent la continuité de la composante tangentielle du champ électrique et la discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique.

Considérons maintenant un élément de volume délimité par la surface ΔS des six faces du parallélépipède (Figure IV.3)

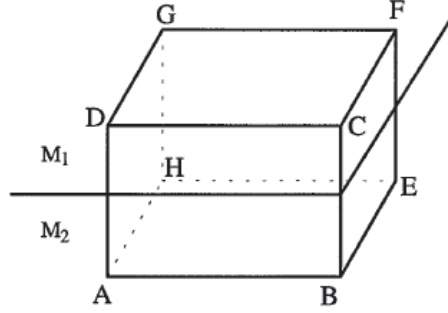


Figure IV.3 : Définition de l'élément de volume

Les distances BC et DA sont supposées faibles devant AB et CD, on néglige les flux qui sortent des surfaces BCFE, ADGH, ABCD et EFGH. Il ne reste plus que le flux à travers la surface que nous noterons $S_0 =$ surface ABEH on a alors :

$$\oiint_{\Delta S} \vec{B} \cdot \vec{ds} = \iint_{S_0} (\vec{n}_1 \cdot \vec{B}_1 + \vec{n}_2 \cdot \vec{B}_2) \cdot \vec{ds} \quad (IV.25)$$

$$\oiint_{\Delta S} \vec{D} \cdot \vec{ds} = \iint_{S_0} (\vec{n}_1 \cdot \vec{D}_1 + \vec{n}_2 \cdot \vec{D}_2) \cdot \vec{ds} \quad (IV.26)$$

La densité de charges est composée de deux parties : la densité volumique de charge ρ_v et la densité surfacique de charges ρ_s sur l'interface. On peut donc écrire la relation suivante.

$$\iiint_{\Delta V} \rho \, dv = \int_{\Delta V} (\rho_v \cdot dv) + \int_{S_0} (\rho_s \cdot ds) \quad (IV.27)$$

L'élément de volume est faible et peut être négligé, on a donc :

$$\iiint_{\Delta V} \rho \, dv = \int_{S_0} (\rho_s \cdot ds) \quad (IV.28)$$

D'après les relations (IV.25) à (IV.27) :

$$\vec{n}_1 \cdot \vec{B}_1 + \vec{n}_2 \cdot \vec{B}_2 = 0 \quad (IV.29)$$

$$\vec{n}_1 \cdot \vec{D}_1 + \vec{n}_2 \cdot \vec{D}_2 = \rho_s \quad (IV.30)$$

Ces deux équations traduisent la continuité de la composante normale de l'induction magnétique et la discontinuité de la composante normale de l'induction électrique.

IV.5 Méthode des Différences Finis (MDF)

IV.5.1 Principe

L'idée principale de la MDF est de fournir une approximation des dérivées partielles qui régissent les problèmes par des « différences » entre les valeurs nodales qui sont séparées par une distance finie. Elle est, historiquement, la première méthode connue pour calculer, sur ordinateur, la solution d'une équation différentielle [43]. Elle consiste à décomposer le domaine d'étude en une grille rectangulaire uniforme dont chaque nœud est à équidistance de son voisin suivant les axes x et y et en chaque nœud, le système différentiel est satisfait. L'utilisation d'un maillage régulier permet d'avoir, en tout point, la même forme pour les équations [44]. Le plus simple de ces maillages réguliers est le maillage carré, (Figure IV .4). L'équation aux dérivées partielles est alors remplacée par un système d'équations algébriques pour les valeurs nodales. Dans le calcul du potentiel et du champ électrique, ces équations sont linéaires et la solution de chaque valeur nodale est obtenue par itération ou inversion de matrice. Une illustration de cette présentation est donnée en prenant l'équation de Laplace (IV. 14) en 2 dimensions, définie dans un domaine donné (Figure IV .4).

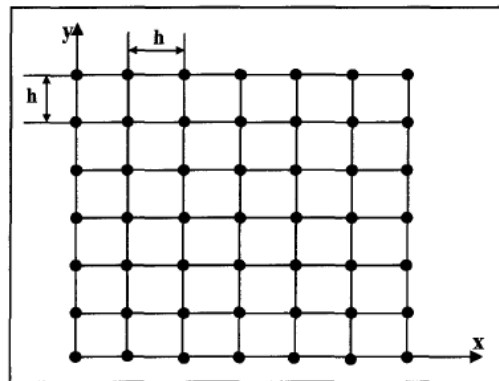


Figure. IV.4 : Maillage carrée

Soient les indices i et j , les coordonnées de la position d'un nœud quelconque, voir figure IV.5 avec $\Delta x = \Delta y = h$ dans le cas d'un maillage carré, et $\phi_{i,j}$ la valeur du potentiel en ce nœud qui est donné par : $\phi_{i,j} = \phi(x_0 + i \Delta x, y_0 + j \Delta y)$ ou x_0 et y_0 sont les conditions initiales.

Comme sur la Figure IV.5 l'approximation algébrique de la dérivée $\frac{\delta \phi}{\delta x}$ est donnée par :

$$\frac{\delta \phi}{\delta x} = \frac{1}{\Delta x} (\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j})$$

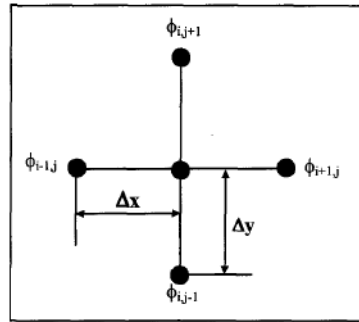


Figure IV.5 : Point central et ses voisins

Une approximation similaire donne :

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \cong \frac{1}{\Delta x^2} \cdot (\Phi_{i+1,j} - 2 \cdot \Phi_{i,j} - \Phi_{i-1,j}) \quad (\text{IV.31})$$

De manière identique, on peut écrire les expressions équivalentes suivant la direction y, ce qui donne :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} \cong \frac{1}{\Delta y} \cdot (\Phi_{i,j+1} - \Phi_{i,j}) \quad (\text{IV.32})$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \cong \frac{1}{\Delta y^2} \cdot (\Phi_{i,j+1} - 2 \cdot \Phi_{i,j} - \Phi_{i,j-1}) \quad (\text{IV.33})$$

L'utilisation de la notation indicielle permet une programmation et une évaluation directe des expressions ainsi obtenues. Lorsque les équations (IV.31) et (IV.33) sont substituées dans l'équation de Laplace, nous obtenons la formulation algébrique suivante :

$$2 \cdot \left(1 + \left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)^2\right) \cdot \Phi_{i,j} \cong \Phi_{i-1,j} + \Phi_{i+1,j} + \left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)^2 \cdot (\Phi_{i,j-1} + \Phi_{i,j+1}) \quad (\text{IV.34})$$

Où $\frac{\Delta x}{\Delta y}$ dépend du choix de la taille du maillage.

On obtient ainsi, un système d'équations linéaires implicites lorsque les formulations analytiques sont considérées à chaque nœud. À partir du système d'équations, on obtient un système algébrique qui peut s'écrire sous forme matricielle :

$$[\mathbf{A}] \{\phi\} = \{\mathbf{B}\} \quad (\text{IV.35})$$

Où $\{\phi\}$ est le vecteur formé par les inconnues en potentiel de tous les points intérieurs au domaine et $\{B\}$ le vecteur des conditions aux limites. La résolution du système (IV.35) permet ainsi d'évaluer le potentiel en chacun des nœuds.

IV.5.2 Avantages de la MDF

- La méthode des différences finies est une méthode simple à appliquer lorsque la géométrie le permet.
- De plus, elle se programme facilement et nécessite peu de mémoire pour le stockage des données.

IV.5.3 Inconvénients de la MDF

- Lorsque la géométrie est de frontière courbée, le schéma ne peut s'appliquer près des frontières irrégulières, cette méthode devient, par conséquent, difficilement applicable. On doit alors chercher à la place, une méthode qui est valide indépendamment de la géométrie [45].
- Elle n'est pas applicable pour des problèmes en 3 dimensions.
- Enfin, cette méthode nécessite la connaissance du potentiel, sur toute la frontière entourant le domaine étudié. Ce qui n'est pas toujours le cas.

IV.6 Méthode des Eléments Finis (MEF)

IV.6.1 Principe

Le principe de cette méthode consiste à diviser le domaine d'étude en plusieurs éléments finis (appelé maillage). C'est une étape très importante, puisque le choix de la forme de l'élément de maillage est primordial dans la précision des résultats obtenus. Il est donc nécessaire de trouver la forme et le degré d'approximation de celui-ci, qui soient les plus adaptés à la géométrie du domaine d'étude. Il existe un grand nombre de formes géométriques pour les éléments de maillage tels que :

- Des triangles, des rectangles, des quadrilatères arbitraires pour les problèmes à deux dimensions.
- Des tétraèdres, des hexaèdres, des cubes, des prismes pour des problèmes à trois dimensions.

Sur chacun des éléments issus de la subdivision, la fonction qui modélise le phénomène est définie par une fonction d'interpolation. Souvent, on choisit des polynômes comme fonction

d'interpolation pour les variables, car ceux-ci sont faciles à intégrer ou à différencier. Le degré du polynôme dépend du nombre de nœuds assignés à chaque élément [46], de la nature et du nombre d'inconnues à chaque nœud, et surtout du degré de dérivabilité des variables apparaissant dans la forme variationnelle associée aux équations aux différences partielles du problème avec conditions aux limites.

Ces fonctions d'interpolation permettent alors de donner une approximation du potentiel ϕ notée $\tilde{\phi}$, sur chaque élément en fonction de ses valeurs aux nœuds de l'élément comme suit :

$$\tilde{\phi} = \sum_{i=1}^{N_e} N_i \phi_i \quad (\text{IV.34})$$

avec N_e le nombre de nœud d'interpolation, N_i les fonctions d'interpolation et ϕ_i les valeurs nodales du potentiel.

Pour illustrer le principe de la MEF, on reprend l'exemple de l'équation de Laplace (IV. 14) et on cherche à minimiser la quantité R tel que :

$$R = \left(\nabla^2 \tilde{\phi} \right) \quad (\text{IV.35})$$

Parmi toutes les méthodes qui permettent d'annuler une grandeur dans un domaine D , la méthode des résidus pondérés est bien connue et souvent utilisée [47].

Elle consiste à choisir un ensemble de fonctions linéairement indépendantes W_n , appelées fonctions de projection, et annuler ainsi toutes les intégrales de R sur chacun des éléments finis.

$$I_n = \int_{\Omega} W_n R \, d\Omega \quad (\text{IV.36})$$

On obtient ainsi une formulation intégrale de la méthode des éléments finis. Par la suite, une intégration par partie permet de diminuer le degré de dérivabilité de potentiel dont on cherche la solution approchée et d'augmenter celui du champ de pondération. Le choix du degré d'approximation sur l'élément sera alors sur le niveau de continuité requis par cette forme intégrale obtenue par intégration par partie que l'on appelle forme variationnelle ou faible.

La méthode des résidus pondérés conduit à des sous méthodes (collocation par point, collocation par sous domaine, Galerkin, moindre carré, ...), selon le choix de la grandeur de pondération. Parmi toutes ces méthodes, la méthode de Galerkin [47] est la plus utilisée.

Elle consiste à prendre les mêmes expressions pour les fonctions de projection et les fonctions d'interpolation, $N_i = W_i$

L'intégration par partie de l'équation (IV.36) donne :

$$I_n = - \int_{\Omega_e} \vec{\text{grad}} \tilde{\phi} \cdot \vec{\text{grad}} W_n d\Omega + \int_{S_e} (\vec{\text{grad}} \tilde{\phi} \cdot \vec{n}) W_n dS_e \quad (\text{IV.37})$$

Pour chaque élément, on annule les n intégrales de I_n (IV.37) qui correspondent aux n fonctions de projection. On obtient un ensemble de n équations à n inconnues formant ainsi un système élémentaire pouvant s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$[A_e] \{ \varphi_e \} = \{ B_e \} \quad (\text{IV.38})$$

$[A_e]$ est la matrice associée à l'élément considéré. Ces coefficients sont fonctions des coordonnées des nœuds de l'élément. Les composantes de $\{ \varphi_e \}$ sont les inconnues du potentiel aux nœuds du même élément. Le vecteur $\{ B_e \}$ tient compte des éventuelles conditions aux limites présentes sur certains nœuds de l'élément considéré. En écrivant (IV.37) pour tous les éléments constituant le maillage, on obtient un système d'équations algébriques dont la solution fournit la distribution du potentiel dans le domaine étudié. La résolution du système final est simple, puisque les équations obtenues sont linéaires et les matrices ainsi formées sont symétriques. Pour déterminer la distribution du champ électrique, il faut calculer la dérivée du potentiel par une méthode numérique adaptée.

IV.6.2 Avantages de la MEF

- La flexibilité est l'un des plus importants avantages de la MEF. Les éléments peuvent avoir plusieurs formes variées et peuvent donc s'adapter facilement à n'importe quelles formes géométriques complexes, et aussi tenir compte des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux.
- Les matrices formant le système final d'équations sont symétriques. Ce qui simplifie grandement la résolution de celui-ci.
- La programmation de la méthode est assez simple surtout lorsqu'il s'agit de tenir compte de l'introduction des conditions aux limites
- La MEF a fait ses preuves dans beaucoup de domaines en ingénierie. De plus, avec son développement important, il existe de très bons logiciels commerciaux qui sont basés sur

cette méthode et qui la rendent très accessible. Et par conséquent, elle est applicable à beaucoup de problèmes sans que nous connaissions nécessairement la MEF en détail.

IV.6.3 Inconvénients de la MEF

- La solution calculée reste toujours dépendante des données numériques initiales (caractéristiques des matériaux, ...) conditions aux limites. En ce sens, l'influence de ces paramètres sur les résultats requiert un nouveau calcul avec d'autres valeurs.
- La modification d'une partie de la géométrie entraîne un nouveau maillage et, donc, une remise à zéro dans les calculs.
- Un mauvais choix du maillage proposé automatiquement par les logiciels, limite la précision des résultats. L'utilisateur doit donc porter une attention particulière lors de cette étape.
- Le traitement d'une problématique par la MEF implique une connaissance parfaite du domaine géométrique et des conditions aux limites. Ce qui complique la mise en œuvre de ce traitement lorsque ce n'est pas le cas.

IV.7 Méthode de simulation de charges

IV.7.1 Principe

Dans la MSC, le champ électrique est simulé par un champ électrique engendré par un nombre de charges discrètes qui sont placées en dehors de la région dans laquelle le champ électrique doit être calculé [48]. Les valeurs affectées aux charges discrètes sont déterminées par la satisfaction des conditions aux limites à des points de contour bien déterminés. Une fois que les valeurs et les positions des différentes charges de simulation sont connues, le potentiel et le champ électriques peuvent être calculés n'importe où dans l'espace considéré.

Le principe de la méthode est simple. Si, plusieurs charges discrètes, de formes différentes, sont présentes dans une région, le potentiel électrostatique, à n'importe quel point C appartenant à cette région, peut être déterminé par la sommation des potentiels résultant des charges ponctuelles (application du théorème de superposition), tant que le point C n'est pas situé sur aucune charge ponctuelle. On peut donc écrire l'équation suivante :

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} \cdot Q_j \quad (\text{IV.39})$$

Où :

- P_{ij} représente le coefficient de potentiel, dépendant du type de charges utilisées et qui peut être évalué analytiquement par résolution de l'équation de Laplace ou de Poisson,
- Q_j représente la charge ponctuelle au point j

Une fois que le type et la position des charges définis, il est possible de déterminer Φ_i et Q_j en tout point de la frontière du domaine étudié. Dans la MSC, les charges de simulation sont placées à l'extérieur de l'espace dans lequel on veut connaître le champ électrique, si, le point C est situé sur la surface d'un conducteur, alors Φ_i en ce point sera égal au potentiel du conducteur. Lorsque cette procédure est appliquée à m points situés sur le contour de T espace considéré, nous obtenons un système de m équations linéaires pour n charges connues, c'est-à-dire :

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ P_{m1} & \cdot & \dots & P_{mn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Q_1 \\ \cdot \\ Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \cdot \\ \Phi_m \end{bmatrix} \quad (\text{IV.40})$$

IV.7.2 Application à un problème présentant plusieurs diélectriques

Le calcul du champ électrique pour des problèmes ayant plus de un diélectrique devient plus compliqué. Ceci est dû au fait que, sous l'influence d'une tension appliquée, une charge nette apparaît à la surface du diélectrique sous l'effet du réalignement des dipôles à l'intérieur de celui-ci [49]. Alors, en plus des électrodes, chaque interface diélectrique-diélectrique doit être simulée par des charges discrètes.

Pour illustrer ce problème, on considère l'exemple décrit par la Figure IV.6. Sur cette figure, les charges 1 à 3 sont utilisées pour simuler l'électrode, tandis que les charges 4 à 7 sont utilisées pour simuler l'interface diélectrique-diélectrique. Les points de contour 1 à 3 sont sélectionnés à la surface de l'électrode et les points 4 à 5 sur l'interface du diélectrique.

Dans le but de déterminer les charges de simulation, un système d'équations est obtenu en imposant les conditions aux frontières suivantes :

- 1 - Sur chaque électrode, le potentiel doit être égal au potentiel connu du conducteur.

2 - À l'interface diélectrique-diélectrique, le potentiel et sa dérivée normale doivent être continus au travers celle-ci.

Lorsque l'on formule les équations pour un point de contour donné, les charges présentes dans le même diélectrique que le point de contour considéré, sont ignorées. Par exemple, sur la figure IV.5, le potentiel au point de contour n° 1 est calculé par superposition des charges 1 à 5 seulement. Similairement, le potentiel et le champ électriques au point de contour n° 5, lorsqu'il est vu depuis le diélectrique A, seront déterminés par superposition des charges 1 à 3 et 6 à 7. De plus, lorsque la condition aux frontières 1 est appliquée aux points de contour 1 à 3, on obtient les équations suivantes :

$$\sum_{j=1}^5 P_{ij} Q_j = \phi_c \quad (i=1) \quad (IV.41)$$

$$\sum_{j=1}^3 P_{ij} Q_j + \sum_{j=6}^7 P_{ij} Q_j = \phi_c \quad (i=2, 3)$$

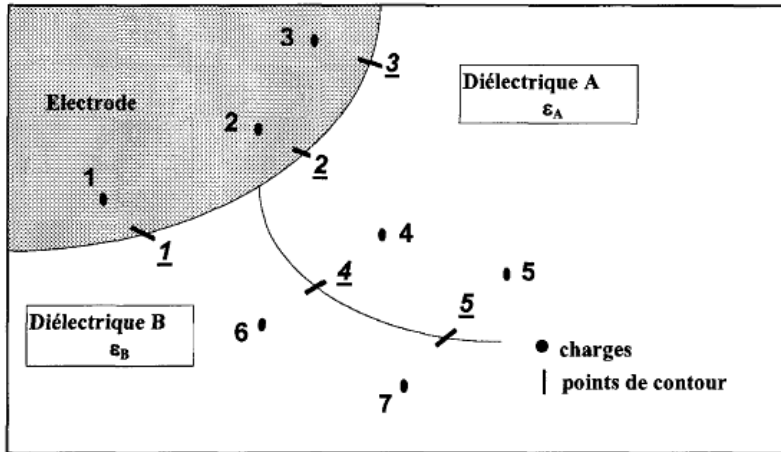


Figure IV.6 : position des charges fictives

Lorsque la condition aux frontières 2 est appliquée pour les points de contour 4 et 5, les équations obtenues sont :

$$\sum_{j=4}^5 P_{ij} Q_j - \sum_{j=6}^7 P_{ij} Q_j = 0 \quad (IV.42)$$

$$(\epsilon_A - \epsilon_B) \sum_{j=1}^3 f_{ij} Q_j + \epsilon_A \sum_{j=6}^7 f_{ij} Q_j - \epsilon_B \sum_{j=4}^5 f_{ij} Q_j = 0 \quad (IV.43)$$

pour $i = 4$ à 5 , f_{ij} sont les coefficients de champ dans la direction normale à la surface du diélectrique au point de contour considéré, ϵ_A et ϵ_B sont les permittivités des milieux A et B respectivement. Les équations (IV.41) et (IV.42) sont résolues afin de déterminer la valeur des charges inconnues.

Il est à noter que le choix du type de charges dans l'utilisation de la MSC est un facteur très important [39]. De manière générale, les types de charges les plus couramment utilisés sont les charges ponctuelles, les lignes chargées de longueur infinie ou semi-finie et les charges en anneau.

IV.7.3 Avantages de la MSC

- La MSC permet de calculer le potentiel et le champ électriques pour des problèmes à plusieurs diélectriques présentant des formes géométriques complexes (comme par exemple les isolateurs de haute tension).
- Cette méthode ne nécessite aucune discrétisation du domaine d'étude ; on ne travaille seulement qu'au voisinage de la frontière de celui-ci.

IV.7.4 Inconvénients de la MSC

- Lorsque le problème à étudier présente plus de deux diélectriques, l'utilisation de la MSC devient alors complexe et la programmation d'un tel modèle s'en trouve détériorée.
- La *M.S.C* est une méthode numérique simple par son expression, mais tout de même assez difficile à mettre en œuvre, en ce qui concerne la précision à atteindre. En effet, la précision requise dépend de nombreux paramètres (comme le type de charges utilisées, leur localisation, leur nombre et le nombre de points de contour).

IV.8 Méthode des éléments finis de frontière (MEFF)

IV.8.1 Introduction

L'utilisation des équations intégrales de frontière dans la résolution des problèmes de calcul de distribution de champ électrique, est assez récente. Cette méthode s'est avérée très efficace dans la résolution des problèmes de champ magnétique et dans le calcul de la distribution du champ électrique, autour des isolateurs pollués [50].

Le principe de cette méthode est la reformulation des équations aux dérivées partielles qui décrivent le problème sous forme d'équations intégrales qui ne font intervenir que des

inconnues sur la frontière du domaine. La solution de ces équations est obtenue par la méthode des éléments de frontière qui est basée sur l'application de la technique des éléments finis sur le contour du domaine étudié [51].

En général, dans les problèmes de calcul de potentiel et de champ électriques, nous trouvons deux formulations différentes pour la MEF : la formulation indirecte et la formulation directe. Pour la formulation directe, on évalue directement le potentiel et le champ électrique normal. Alors que pour la formulation indirecte, la distribution de charges est évaluée dans un premier temps et on en déduit, ensuite, le potentiel et le champ électrique. Nous présenterons la formulation indirecte qui est utilisée jusqu'à maintenant pour le calcul de champ et du potentiel en tenant compte de la pollution [52].

IV.8.2 Formulation indirecte de la MEF

Une expression par formulation indirecte peut être obtenue si, les conditions aux frontières peuvent s'exprimer sous forme de potentiel de simple couche en tout point [53]. Pour la formulation indirecte, on part de l'équation suivante :

$$\phi = \int_S \frac{\rho_s}{\epsilon_0} G dS \quad (IV.44)$$

où ρ_s est la distribution de charges surfaciques et G la fonction de Green, ϕ est le potentiel à calculer, ϵ_0 est la permittivité de l'air [52].

En prenant la dérivée de l'équation (IV.44) suivant la normale \vec{n} , on obtient :

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \int_S \frac{\rho_s}{\epsilon_0} \frac{\partial G}{\partial n} dS \quad (IV.45)$$

Soit un point situé sur une interface diélectrique-diélectrique Γ_{ij} où la normale \vec{n} est dirigé du diélectrique (i) vers le diélectrique (j). En considérant un point appartenant au diélectrique (j) et approchant la surface Γ_{ij} le long de la normale \vec{n} , on obtient :

$$\epsilon_0 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial n} \right)_j = -\frac{1}{2} \rho_s + \int_{\Gamma} \rho_s \frac{\partial G}{\partial n} d\Gamma \quad (IV.46)$$

En répétant le procédé pour un point appartenant au diélectrique (i), on obtient :

$$\epsilon_o \left(\frac{\partial \Phi}{\partial n} \right)_i = + \frac{1}{2} \rho_s + \int_{\Gamma} \rho_s \frac{\partial G}{\partial n} d\Gamma \quad (\text{IV.47})$$

Le terme $\pm \frac{1}{2} \rho_s$ de (IV.46) et (IV.47) est dû à la discontinuité de la composante normale du champ électrique $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$ à travers l'interface Γ_{ij} , à cause de la présence des charges de polarisation.

En multipliant (IV.46) par ϵ_j et (IV.47) par ϵ_i , en les additionnant, on obtient donc :

$$\rho_s = -2 \left(\frac{\epsilon_i + \epsilon_j}{\epsilon_i - \epsilon_j} \right) \int_{\Gamma} \rho_s \frac{\partial G}{\partial n} d\Gamma \quad (\text{IV.48})$$

L'équation (IV.48) est valide pour tous les points situés sur les interfaces diélectriques diélectriques.

Pour les points situés sur les électrodes, on utilise l'équation suivante :

$$V_i = \int_{\Gamma} \frac{\rho_s}{\epsilon_o} G d\Gamma \quad (\text{IV.49})$$

où V_i est le potentiel calculée au point i.

Les équations (IV.48) et (IV.49) permettent de calculer la densité de charges équivalentes à la surface des conducteurs et du diélectrique.

IV.8.3 Résolution des équations intégrales

Le traitement numérique des équations intégrales se fait par application de la méthode des éléments finis sur la frontière du domaine étudié (frontière sur laquelle sont évaluées les équations intégrales) Pour ce faire, la frontière est discrétisée en éléments géométriques sur lesquels sont évalués les différents noyaux $\int_{\Gamma} G d\Gamma$ et $\int_{\Gamma} \frac{\partial G}{\partial n} d\Gamma$, par une méthode numérique adaptée, en général par quadrature de Gauss [54].

Les éléments géométriques utilisés sont de type segments de droite (discrétisation d'une courbe) pour un problème en deux dimensions, et pour des problèmes en trois dimensions, les éléments utilisés lors de la discrétisation, sont de type triangulaire ou quadrilatère

(discrétisation d'une surface). En fait, ce sont les mêmes types d'éléments que l'on retrouve dans la MEF pour des problèmes à une et deux dimensions respectivement.

Une fois la transformation sur l'espace de référence effectuée, il ne reste plus qu'à évaluer les noyaux sur tous les éléments de discrétisation en chaque point de collocation. Cela permet d'obtenir un système d'équations linéaires, qui est ensuite résolu par la méthode d'élimination de Gauss. Le système ainsi obtenu est de la forme suivante :

$$[A] \{ \rho_s \} = \{ B \} \quad (IV.50)$$

où $\{ \rho_s \}$ représente le vecteur d'inconnues de charges, $[A]$ la matrice des coefficients relatifs au calcul des différents noyaux et $\{ B \}$ le vecteur contenant les différentes conditions aux limites.

Après avoir résolu le système de matrice (IV.50) et ainsi déterminé la densité de charges équivalentes, le potentiel et le champ électriques peuvent alors être calculés en tout point du domaine d'étude.

IV.8.4 Avantages de la MEFF

- La discrétisation du milieu infini ne cause plus de problème, puisque tout est ramené sur la frontière du milieu étudié.
- La transformation des équations aux dérivées partielles en équations intégrales, réduit de un la dimension du problème, et même de deux si le problème présente une symétrie de révolution.
- Lorsqu'une modification au niveau de la géométrie intervient, il n'est pas nécessaire de reconsidérer tout le maillage comme pour la MEF. Il suffit seulement de modifier les paramètres de la portion de la frontière considérée, puisque la formation de base des équations intégrales est exempte de toute référence à des géométries particulières.
- Par rapport aux autres méthodes numériques, le nombre d'inconnues à déterminer est moindre pour un problème équivalent, d'où un gain en temps de calcul.

IV.8.5 Inconvénients de la MEFF

- La méthode indirecte ne permet pas de calculer directement le potentiel et le champ électrique. Cela nécessite donc des calculs supplémentaires qui peuvent s'avérer coûteux pour des problèmes de grandes tailles.

- L'extension de la MEF aux problèmes non linéaires est difficile. Dans ces conditions, on doit discrétiser la totalité du domaine où se produit la non linéarité matérielle ou géométrique, perdant ainsi l'avantage de la MEF d'une discrétisation de la frontière uniquement.

IV.9 Conclusion

L'étude des notions de base de l'électromagnétisme sur les diélectriques, est primordiale pour l'engineering de haute tension, vu leurs rôles dominants dans la conception des isolateurs.

Dans ce chapitre, nous avons introduit différentes relations des équations de Maxwell caractérisant le comportement électrique des matériaux diélectriques, point de vue champ et potentiel électriques.

Les équations qu'on obtient par la modélisation des phénomènes électromagnétiques, ont une forme simple. Cependant, elles n'ont le plus souvent pas de solution analytique lorsqu'on les applique à des situations réelles. On a alors recours aux méthodes numériques pour les résoudre.

Les méthodes des différences finies et des éléments finis de frontières présentent l'inconvénient d'utiliser un nombre élevé d'inconnues. Lorsqu'il s'agit de travailler sur des configurations de formes complexes en deux ou trois dimensions pour lesquelles, le maillage régulier de la MDF n'est pas adapté. De plus, pour ces deux méthodes, les approximations sont faites dans tout l'espace, et cela constitue un handicap pour la résolution de problèmes non bornés.

La méthode de simulation de charges pose un problème de localisation des charges fictives. Par contre, elle est très bien adaptée pour la modélisation de configurations complexes comme des isolateurs. La méthode des éléments finis semble présenter des avantages importants par rapport aux précédentes. C'est en particulier la prise en compte d'une surface conductrice qui devient intéressante avec cette méthode, comme dans le cas d'isolateurs pollués. C'est pourquoi cette méthode a été retenue pour réaliser les différentes simulations dans le chapitre suivant, par le biais du logiciel commercial COMSOL.

Chapitre V

Simulation du champ et du potentiel électriques

V.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous nous sommes intéressés à la détermination des répartitions des potentiel et du champ électriques le long des isolateurs 175 CTV. Pour cela, le code de calcul COMSOL Multiphysics 3.5, basé sur la méthode des éléments finis, a été utilisé.

Plusieurs paramètres ont été variés à savoir, la conductivité de la couche polluante, le niveau de tension de la ligne, le nombre d'éléments de la chaîne et la distance par rapport à l'axe de l'isolateur.

V.2 Simulation

COMSOL Multiphysics est un outil très employé dans des secteurs divers de recherche, car il facilite amplement les étapes de modélisation et de simulation, soit : la définition de la géométrie, des propriétés physiques des matériaux présents et des conditions aux frontières, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats. Par ailleurs, le logiciel ne demande pas de connaissances approfondies dans les mathématiques ou les analyses numériques. En effet, toutes les équations nécessaires à la résolution sont déjà prédéfinies. Il suffit alors de préciser dans quel domaine (électromagnétisme, transfert de chaleur, acoustique,...) et dans quel régime (stationnaire, temporel, ...), le modèle doit être construit.

Ce logiciel utilise la méthode des éléments finis dont le principe est décrit au Chapitre V, section IV.6. La modélisation et la simulation de l'isolateur 175 CTV peuvent se résumer dans les quatre étapes successives suivantes :

- La première étape consiste à définir la géométrie entière en deux dimensions de l'isolateur par l'intermédiaire d'un programme Matlab qui sera ensuite emporté vers COMSOL.
- La deuxième étape porte sur la définition des propriétés électriques des matériaux présents. Cela consiste à définir les permittivités relatives et les conductivités volumiques pour chaque partie de l'isolateur. De plus, il faut définir les conditions aux limites qui se traduisent par le potentiel imposé sur chaque électrode (conditions de Dirichlet).
- La troisième étape est consacrée à la résolution du problème par l'application de la méthode numérique et par la construction du système d'équations (équation IV.14), et cela en introduisant les facteurs de chaque partie de l'équation.
- La dernière étape consiste en l'affichage des résultats comme le potentiel et le champ électriques avec leurs modules, suivant chaque partie de l'isolateur et leurs répartitions spatiales.

Dans notre simulation, nous avons choisi l'isolateur 175 CTV. Ce dernier est constitué de trois parties ayant des propriétés différentes : le verre ayant une permittivité relative de 6, le capôt et la tige en métal de permittivité relative de 1000000 et de conductivité de 1000000, rattachés entre eux par du ciment ayant une permittivité relative de 5. L'air entourant l'isolateur a une permittivité de 1,0005.

Afin de simuler la couche polluante, nous avons rajouté une fine couche autour du verre qui a une permittivité relative de 50 (représentant une solution saline), et dont nous varierons la conductivité.

Concernant le maillage, la densité des éléments finis est important pour les régions critiques (proches de la surface de l'isolateur) où une plus grande précision est exigée, car les propriétés électriques des matériaux sont très changeantes. En effet, nous avons considéré 23387 éléments dans le cas d'une chaîne propre et sèche, et 37083 éléments lorsqu'elle est polluée.

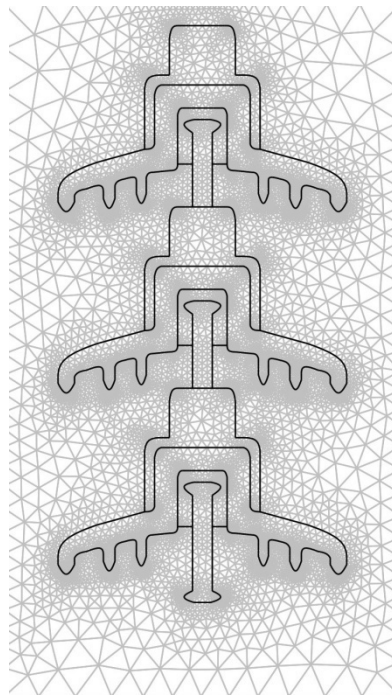


Figure V.1 : Discretisation en éléments finis de la chaîne 175 CTV

V.3 Résultats de la simulation

Cette section est consacrée à l'étude des distributions du potentiel et du champ électriques le long d'une chaîne d'isolateurs 175 CTV.

Pour illustrer l'impact d'un paramètre quelconque noté x , nous traçons le potentiel et le champ en fonction de la ligne de fuite de la chaîne, pour différents x .

V.3.1 Etude du potentiel

➤ Influence de la conductivité

Nous nous sommes intéressés à la détermination de la répartition du potentiel le long de la chaîne d'isolateurs 175 CTV, composée de trois éléments, en fonction de la conductivité. Pour cela, nous avons introduit dans le logiciel, outre des valeurs de la conductivité déjà considérées lors des essais (0, 70, 210, 740 $\mu\text{S}/\text{cm}$) une conductivité excessive de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La tension a été maintenue constante et égale à 30 kV. Ceci permet de simuler le comportement d'une chaîne d'isolateurs de ligne 30 kV.

Les figures V.2 et V.3 illustrent respectivement la variation du potentiel le long de la ligne de fuite et la distribution du potentiel le long de la chaîne d'isolateurs, pour les conductivités considérées. Nous remarquons que la variation de la conductivité de la couche polluante n'a pratiquement pas d'effet sur le potentiel le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs. Aucune différence remarquable n'est observée.

En comparant les résultats relatifs aux potentiels obtenus lorsque la chaîne est propre et lorsqu'elle est polluée, aucune différence remarquable n'a été observée.

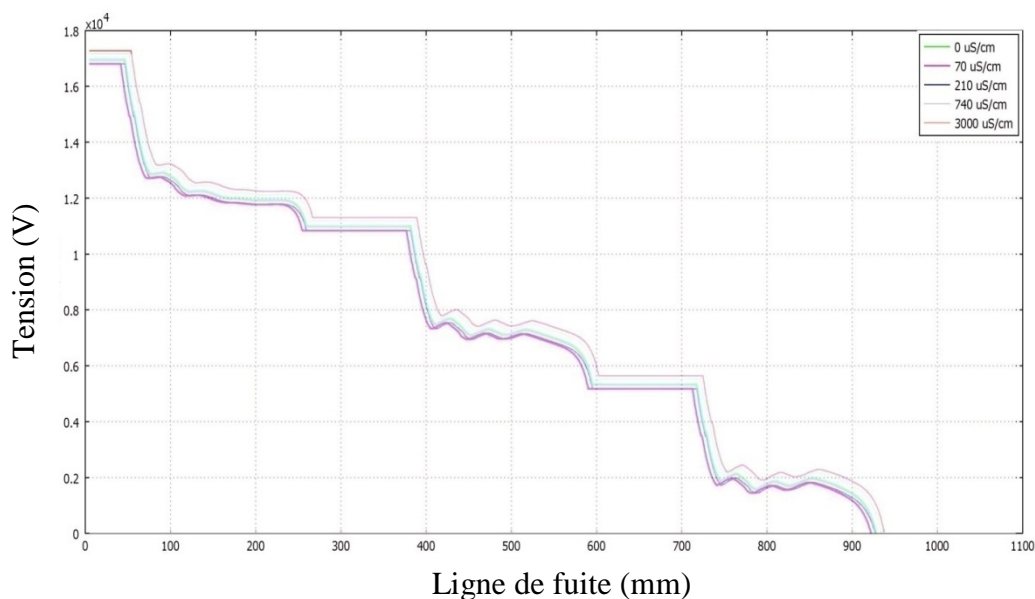


Figure V.2 : Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne

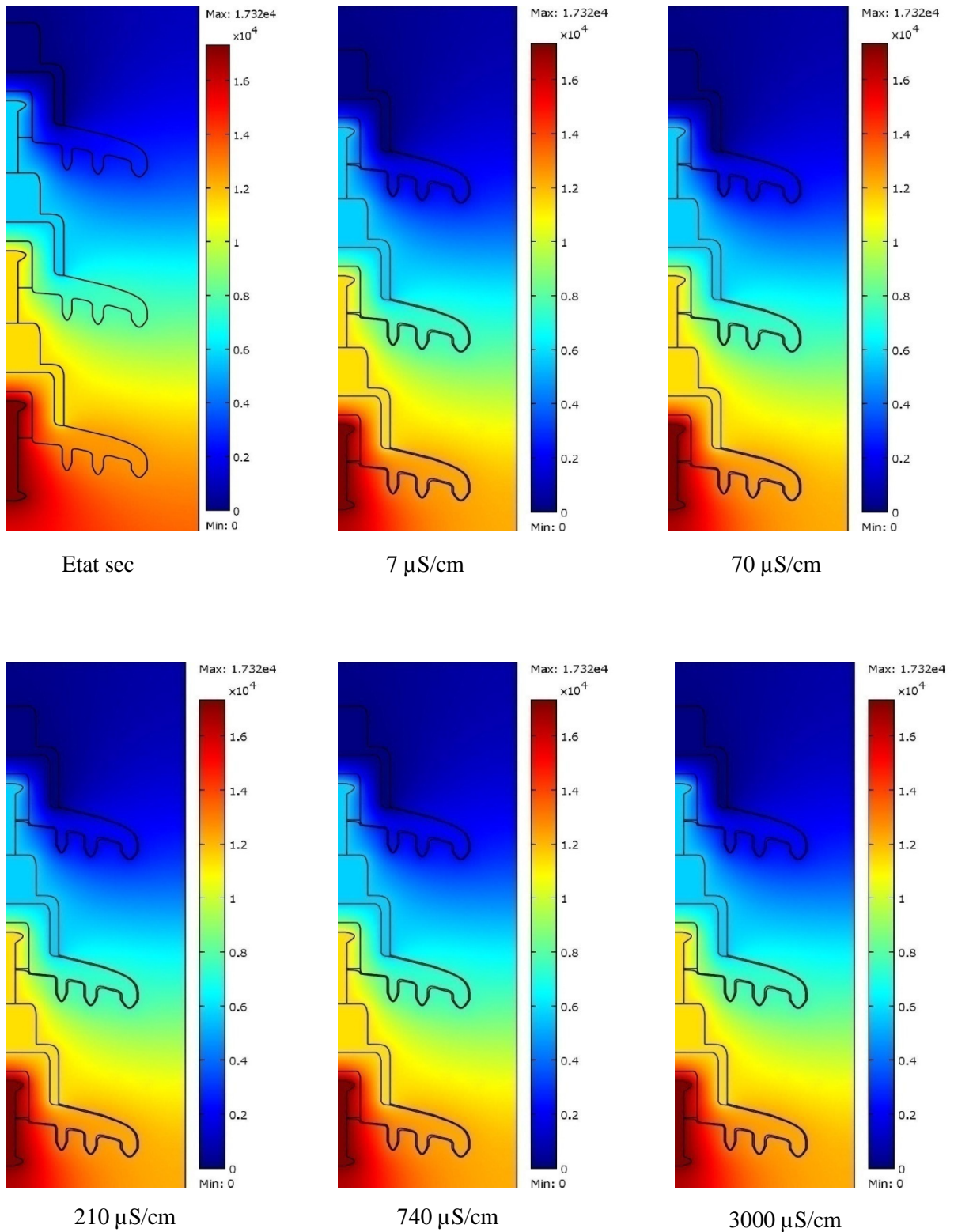


Figure V.3 : Distribution (échogrammes) du potentiel en fonction de la conductivité

➤ **Influence de la tension de la ligne**

La figure V.4 donne la variation du potentiel en fonction de la ligne de fuite, pour différentes tensions. Trois niveaux de tensions ont été considérés. Nous constatons qu'en fonction de cette tension, le potentiel se distribue de manière équitable, le long de la ligne de fuite, sur les trois éléments (un tiers de la tension appliquée sur chaque élément). Les trois courbes passent également par trois régions où le potentiel reste constant. Il s'agit des parties métalliques de la chaîne d'isolateurs (capôts et tiges).

La figure V.5, donnant la distribution du potentiel le long de la chaîne d'isolateurs, montre qu'en fonction de la tension, seules les valeurs du potentiel changent. La forme demeure la même.

Les capôt et les tiges étant des éléments métalliques, la tension à leurs niveaux reste constante ; ce sont les parties équipotentielles.

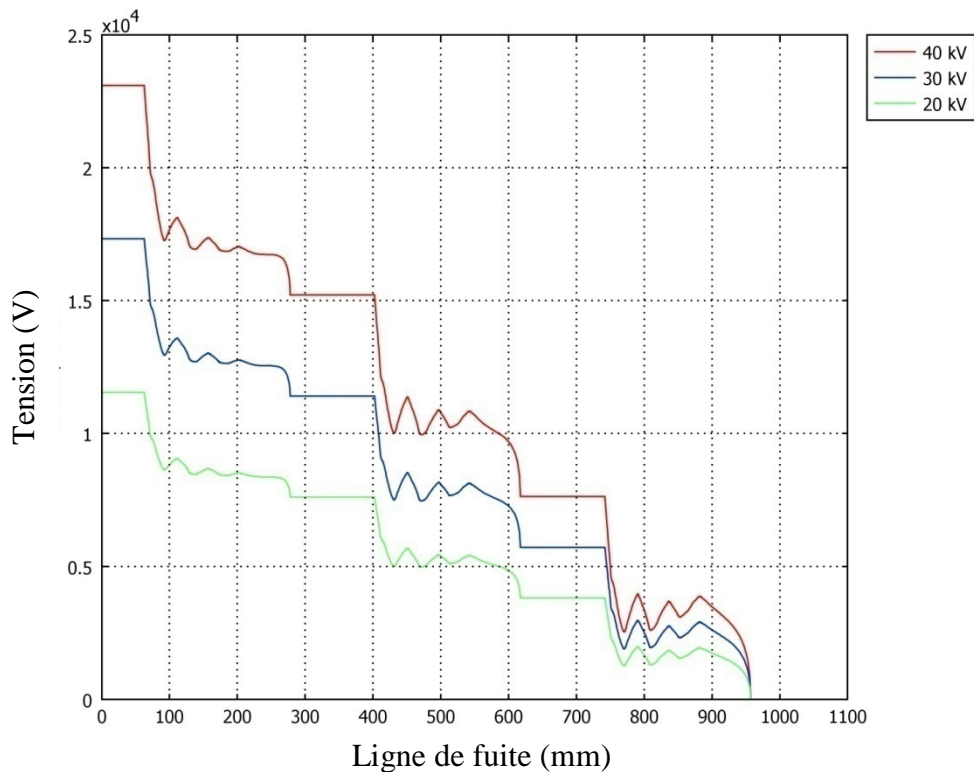
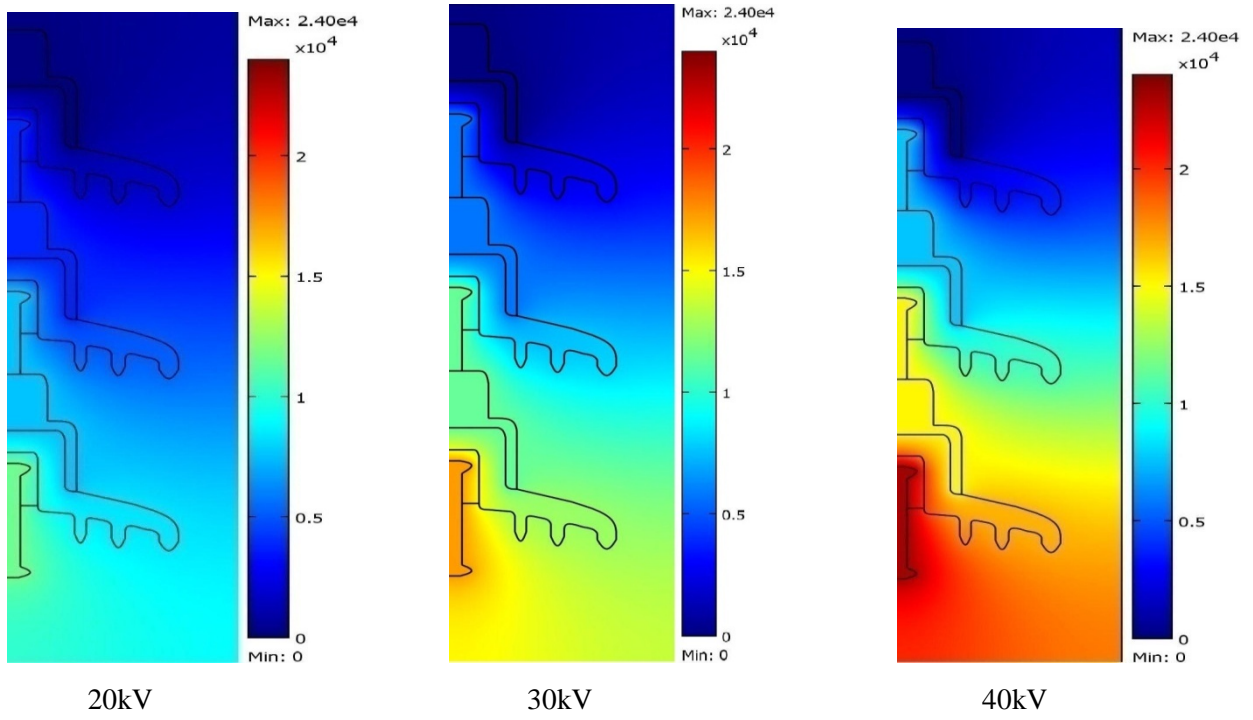
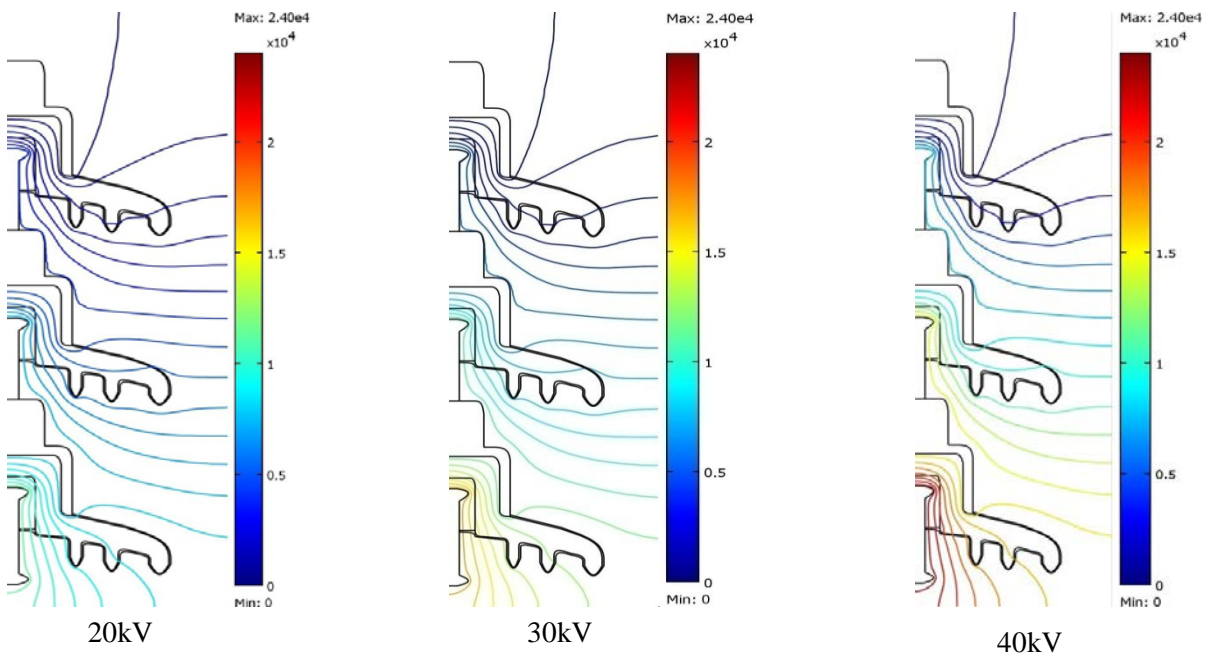


Figure V.4 : Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne



(a) Echogrammes



(b) Lignes

Figure V.5 : Distribution du potentiel en fonction de la tension de la ligne

➤ **Influence du nombre d'éléments**

Dans le cas où un ou deux éléments de la chaîne sont endommagés (éléments cassés), la tension sera alors appliquée sur les éléments restants de la chaîne.

La figure V.6 montre le potentiel le long de la ligne de fuite de la chaîne d'un, deux ou trois isolateurs, pour un niveau de tension constant (30 kV). Nous constatons que la tension au niveau des parties métalliques est fixe, tandis qu'elle chute brusquement au contact des parties isolantes (verre et ciment). Cela est nettement visible dans le cas d'un seul élément.

En observant la répartition du potentiel présenté sur la figure V.7, nous remarquons une modification de la distribution du potentiel ainsi que la répartition des lignes équipotentielles qui se concentrent naturellement sur les éléments non-défaillants.

Un tel cas de figure (isolateurs endommagés) représente un vrai danger pour la ligne de 30kV.

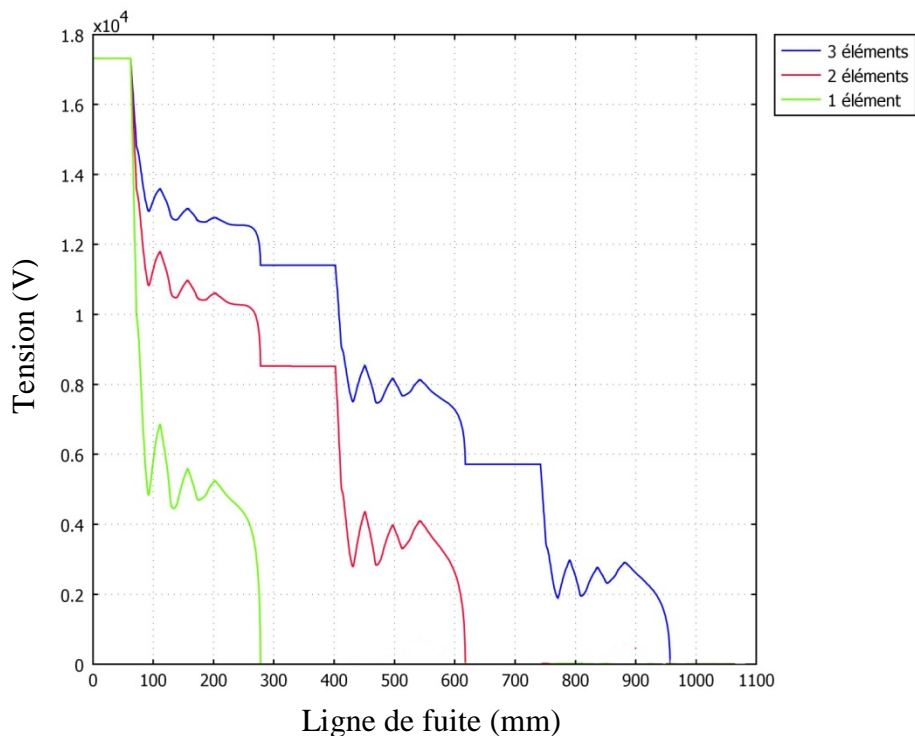


Figure V.6 : Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne

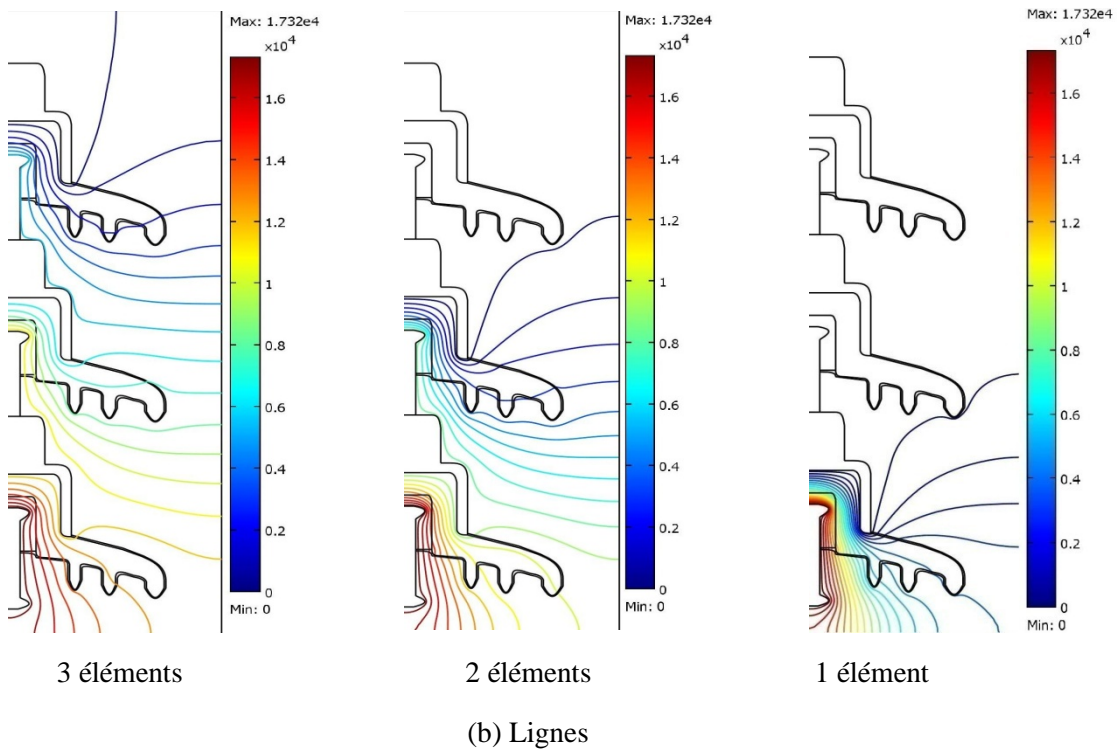
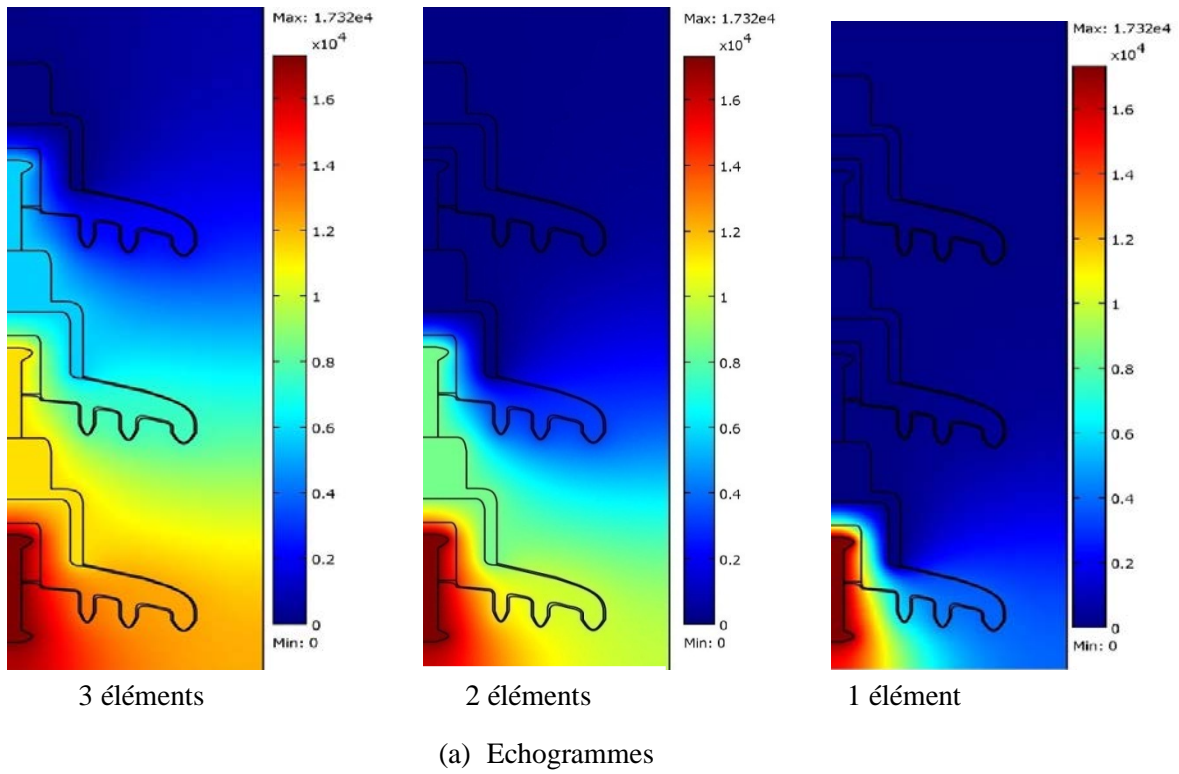


Figure V.7 : Influence du nombre d'éléments sur la distribution du potentiel

➤ **Potentiel électrique le long d'un axe parallèle à celui de la chaîne d'isolateurs**

La figure V.8 illustre le potentiel électrique le long de l'axe de la chaîne ainsi qu'à 30 mm et à 70 mm de cet axe. Les éléments métalliques (capôts et tiges) sont facilement identifiés puisqu'ils représentent des tensions fixes.

Nous constatons que la tension maximale se situe au niveau de l'axe de la chaîne, et diminue à fur et à mesure que l'on s'en éloigne. Nous remarquons également que chacun des éléments de la chaîne supporte un tiers de la tension de service.

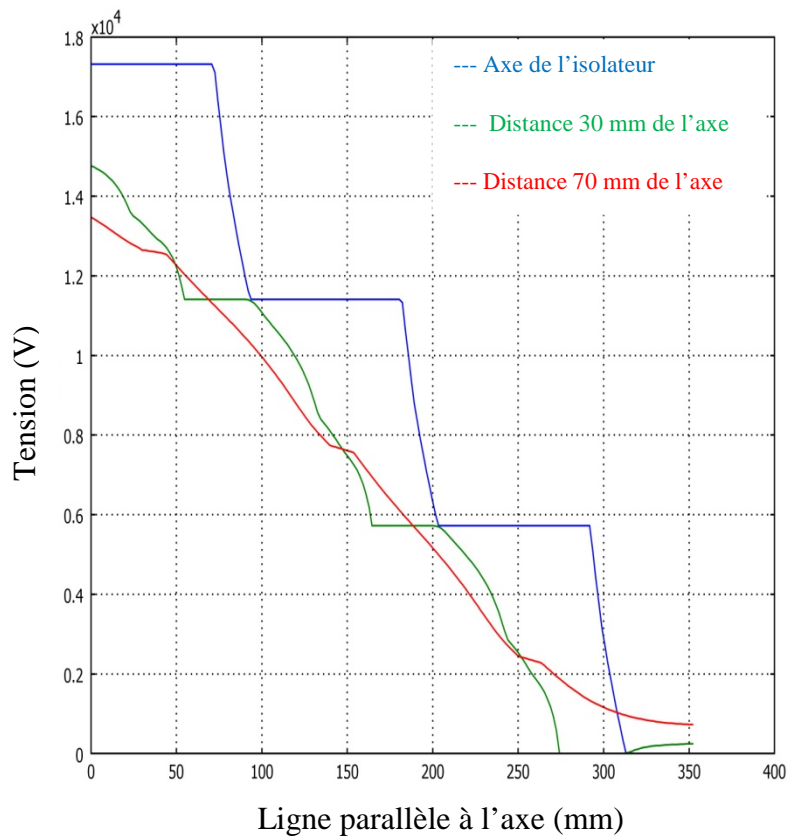
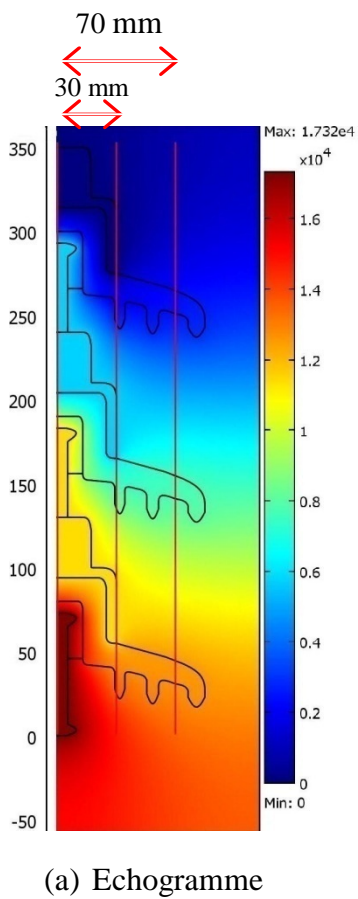


Figure V.8 : Distribution du potentiel électrique

V.3.2 Distribution du champ électrique

➤ Influence de la conductivité

Pour la même tension (30 kV), la figure V.9 montre la variation de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne. A l'exception du capôt relié à la terre, où l'intensité du champ électrique est très élevée notamment lorsque la chaîne est polluée, le champ électrique n'est pratiquement pas affecté par l'état de surface (pollué ou propre) de l'isolateur. En outre, la figure V.10 montre que la conductivité n'a pratiquement aucune incidence sur la distribution du champ électrique.

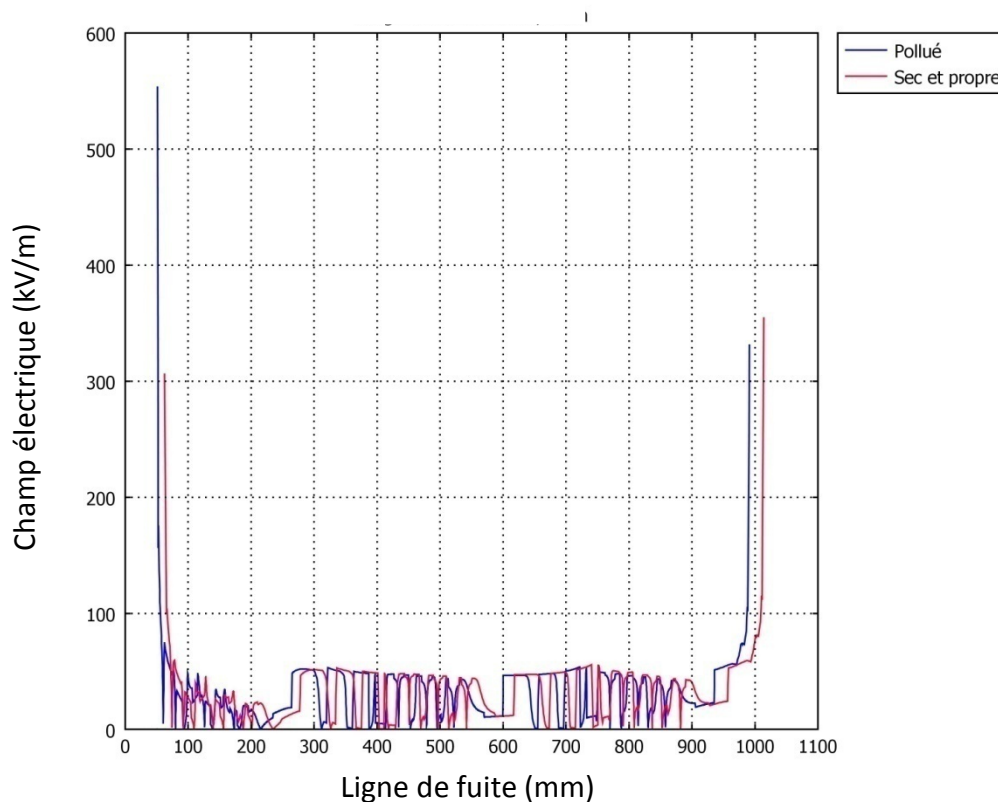


Figure V.9 : Champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs

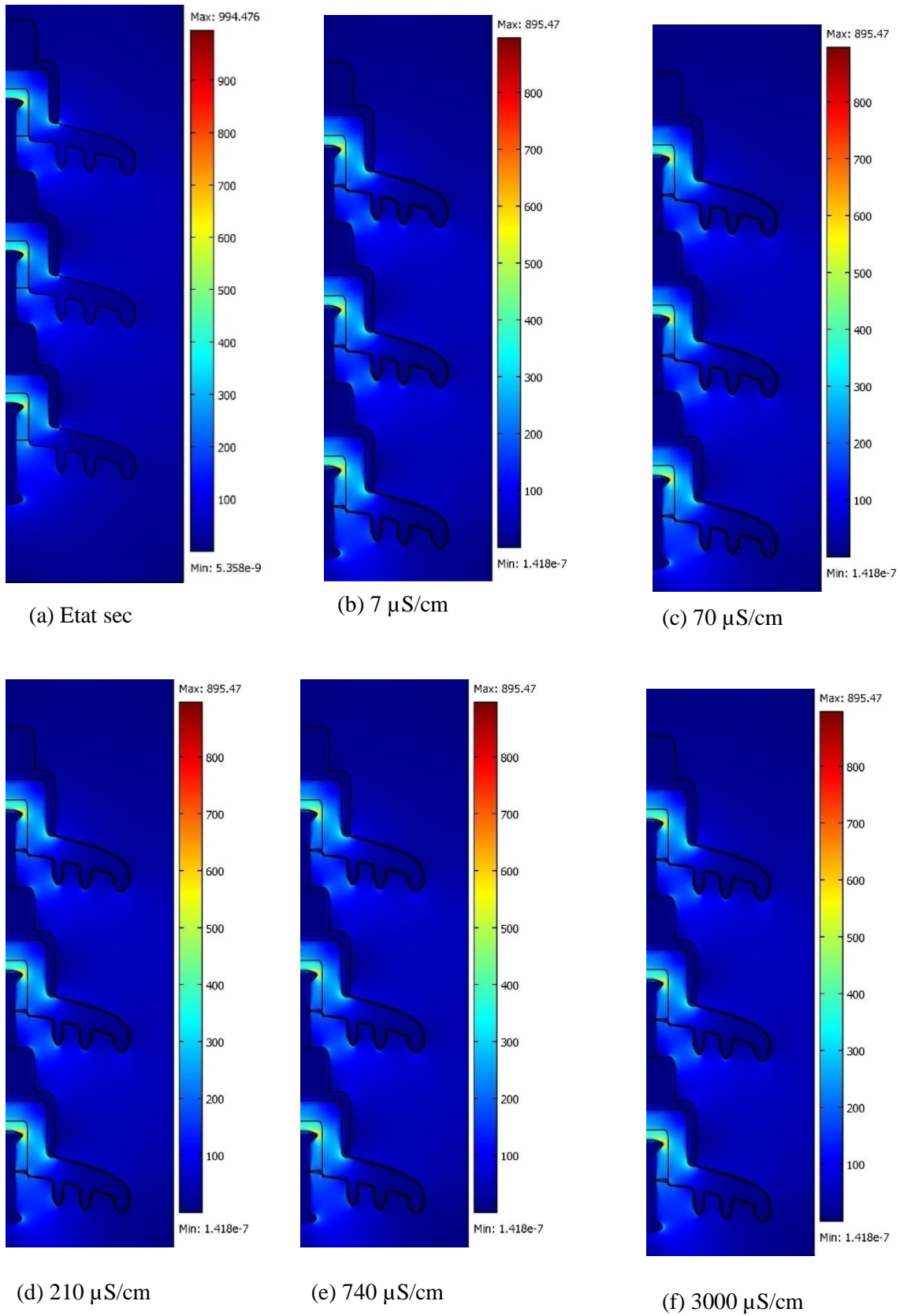


Figure V.10 : Distribution (échogrammes) du champ électrique en fonction de la conductivité

➤ **Influence de la tension de la ligne**

Sur la figure V.11, nous présentons le champ électrique le long de la ligne de fuite, pour différentes tensions. Selon cette figure, l'accroissement de la tension de la ligne entraîne l'augmentation de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs à l'état propre. Nous remarquons également que le champ électrique atteint ses valeurs maximales aux extrémités de la chaîne (électrodes HT et de mise à la terre).

La figure V.12 montre la distribution du champ électrique le long de la chaîne d'isolateurs. Il est évident, comme illustré sur cette figure, que le champ s'intensifie avec l'augmentation de la tension appliquée.

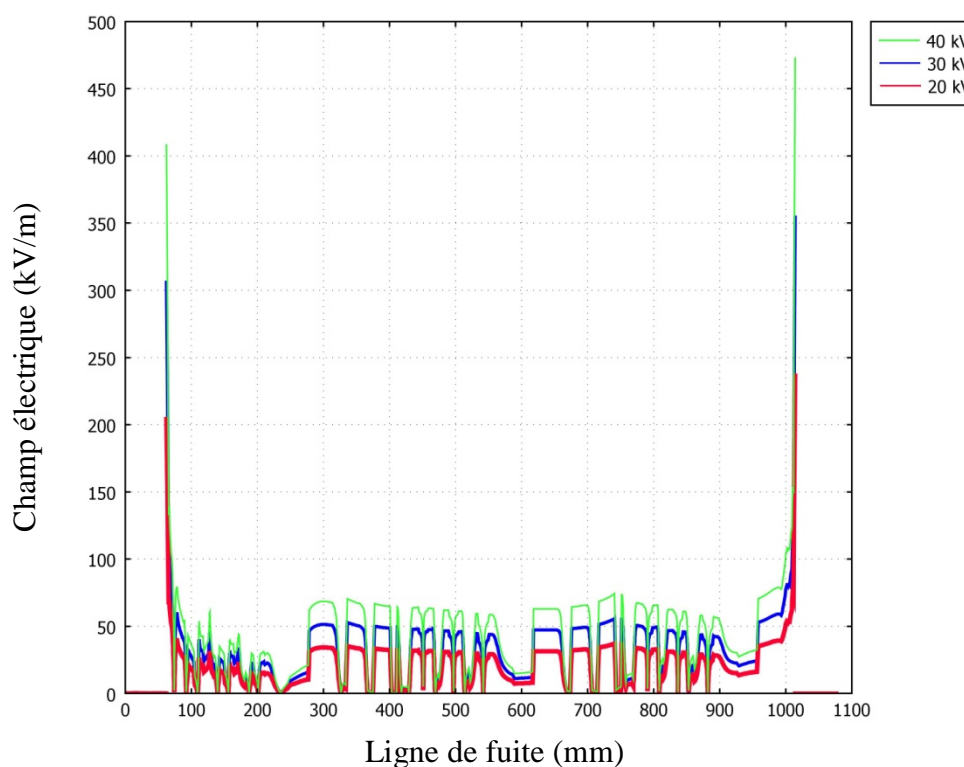
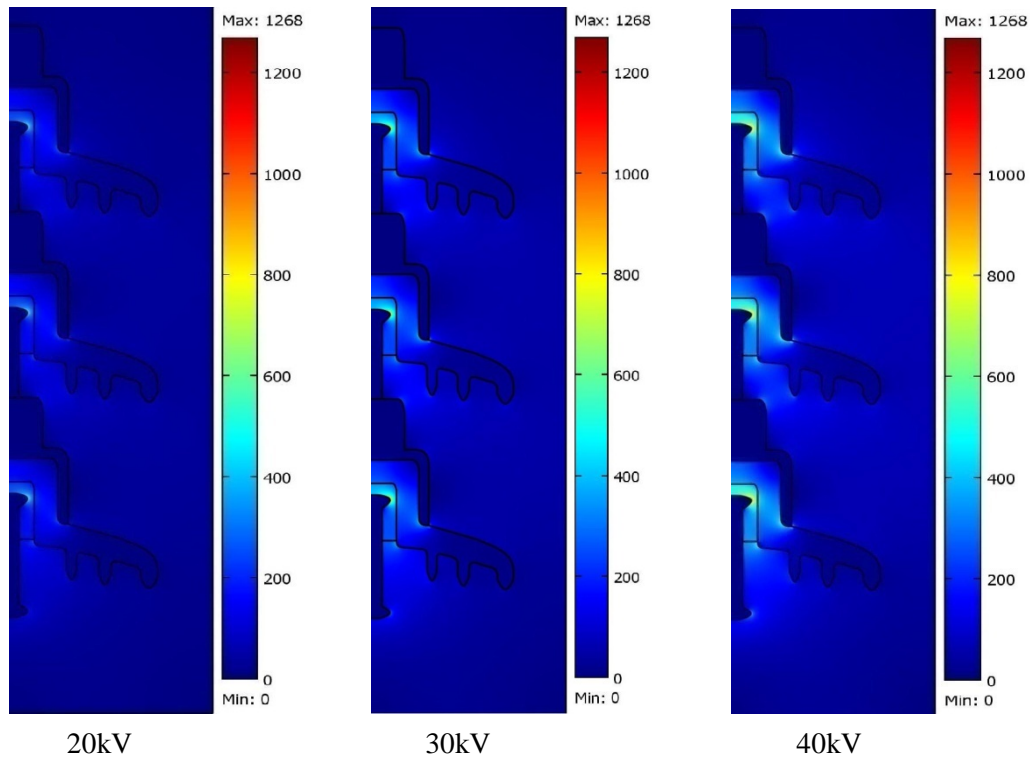
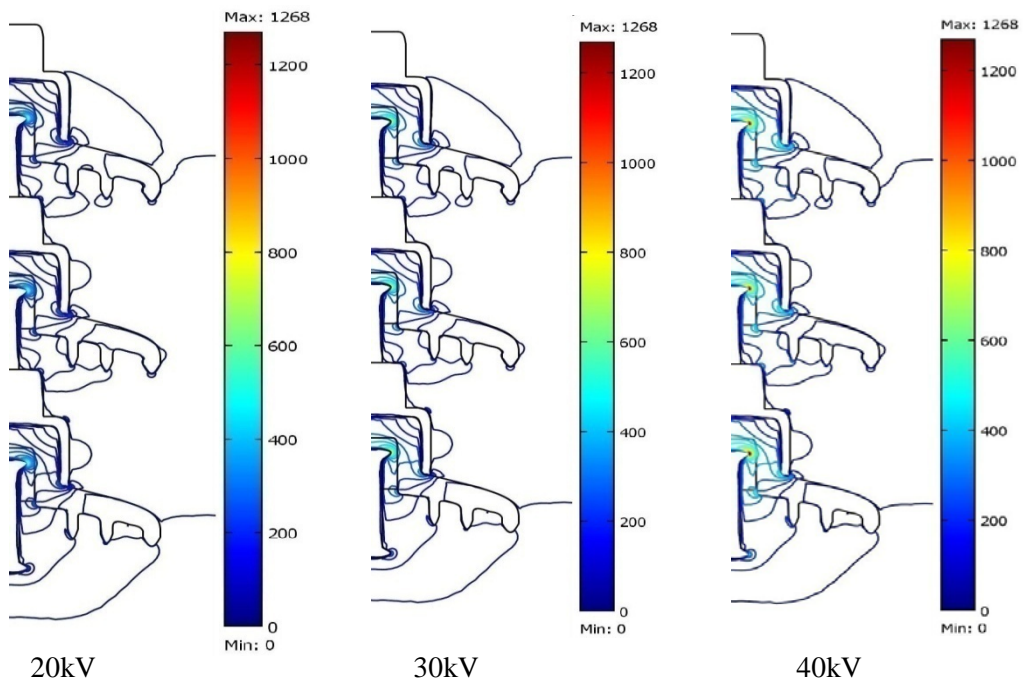


Figure V.11 : Champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs



(a) Echogrammes



(b) Lignes

Figure V.12 : Distribution du champ électrique en fonction de la tension de la ligne

➤ **Influence du nombre d'éléments**

La figure V.13 montre l'évolution de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs en fonction du nombre d'isolateurs. Nous observons que le champ électrique est intense au niveau des électrodes. Ceci confirme les résultats obtenus précédemment. Dans le cas d'un seul élément, l'intensité du champ électrique au niveau des électrodes dépasse largement le seuil recommandé (500 kV/m [32]).

La figure V.14 illustre la distribution du champ électrique le long de la chaîne d'isolateurs. Nous voyons clairement que le champ électrique se concentre uniquement sur les éléments soumis à une tension (électrodes HT et terre). Par ailleurs, l'intensité du champ électrique augmente avec la diminution du nombre d'éléments.

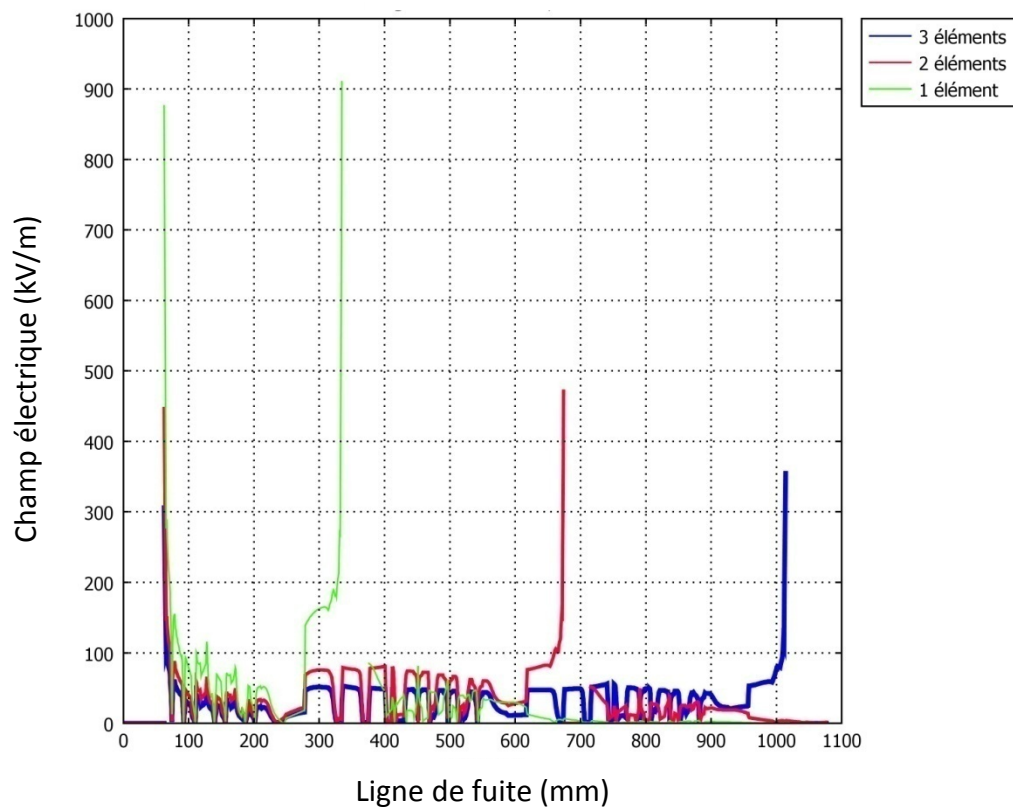
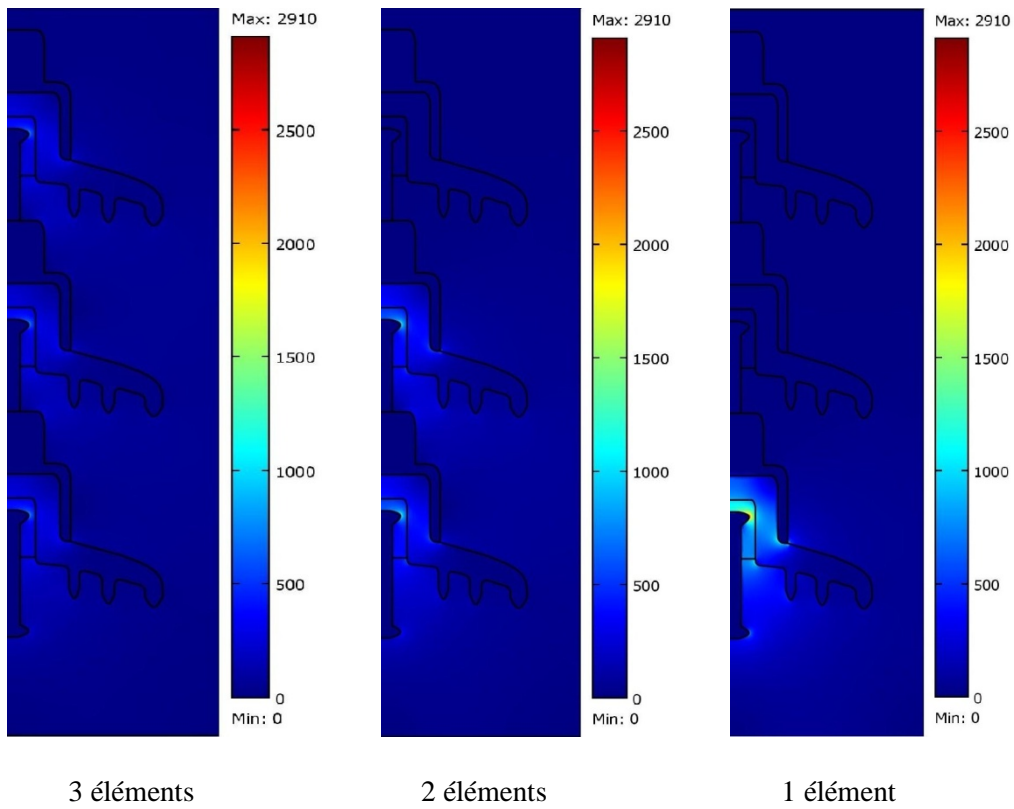
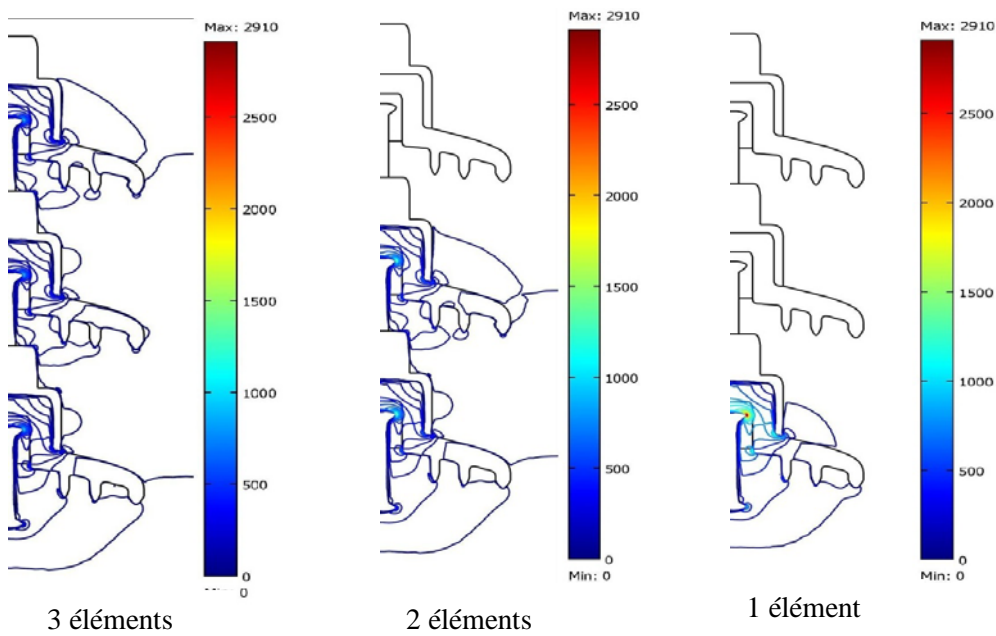


Figure V.13 : Champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs



(a) Echogrammes



(b) Lignes

Figure V.14 : Distribution du champ électrique en fonction du nombre d'éléments de la chaîne

➤ **Champ électrique le long d'un axe parallèle à celui de la chaîne d'isolateurs**

La figure V.15 illustre l'intensité du champ électrique le long des lignes parallèles à l'axe de la chaîne d'isolateurs. Sur la ligne de l'axe de la chaîne, le champ électrique est nul dans les parties métalliques, il atteint sa valeur maximum dans le ciment, et diminue légèrement dans le verre. A une distance de 11 mm de l'axe de la chaîne, le champ électrique prend une valeur maximale dans le ciment à proximité de la tige et reste toujours nulle dans les parties métalliques. A 55 mm de l'axe de la chaîne, un pic de l'intensité du champ est observé dans l'air, à proximité des nervures de l'isolateur.

Il est à noter que la distribution du champ électrique est identique sur les trois isolateurs.

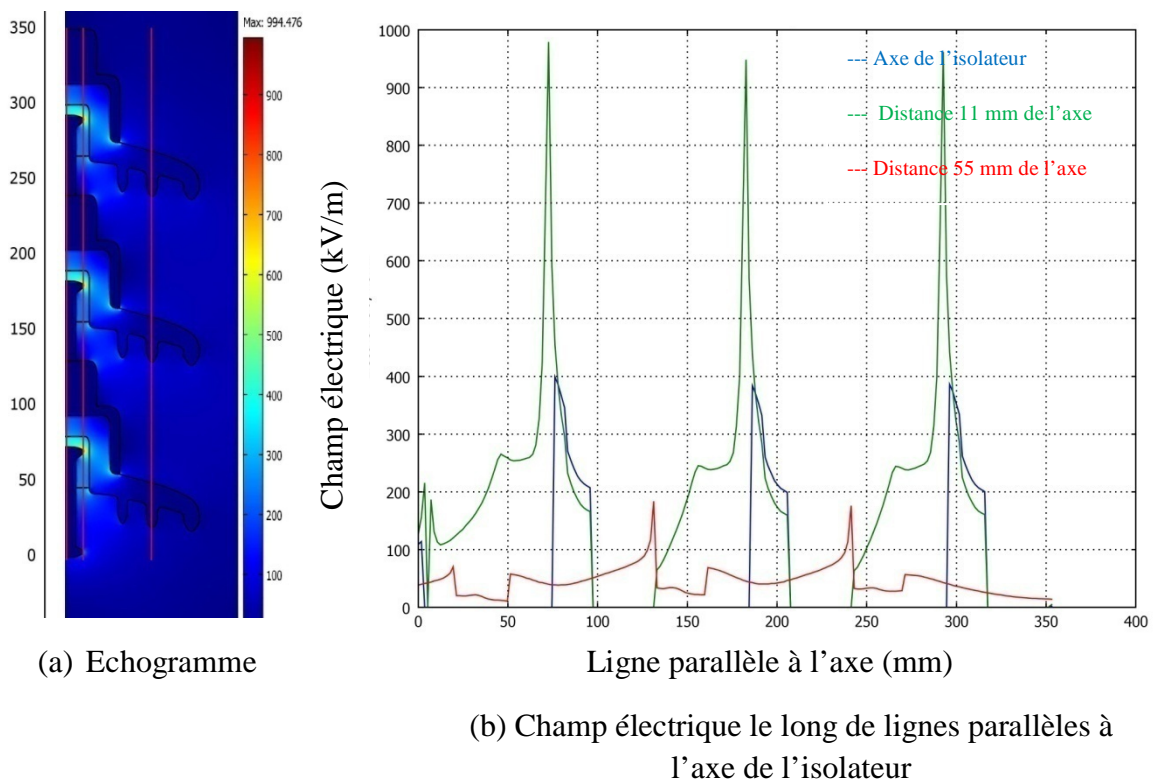


Figure V.15: Distribution du champ électrique

V.4 Conclusion

Utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics, basé sur la méthode des éléments finis, nous avons pu analyser les distributions du potentiel et du champ électriques le long d'une chaîne d'isolateurs 175 CTV, soumise à différents paramètres électro-géométriques, à savoir la conductivité de la couche polluante, la tension de la ligne, le nombre d'isolateurs et la

distance par rapport à l'axe de la chaîne. Comme principaux résultats, nous pouvons dire que la conductivité de la couche polluante n'a pratiquement pas d'effet sur les répartitions du potentiel et du champ électriques. Par contre l'état de surface de l'isolateur influe sur la répartition du champ électrique. Ce dernier est plus élevé dans le cas où la chaîne est polluée. Nous avons vu également que la distribution du potentiel le long d'une chaîne d'isolateurs est pratiquement identique à chaque élément de la chaîne. Par ailleurs, les parties près du conducteur sont les plus exposées aux contraintes électriques, à savoir la différence de potentiel et le champ électrique. Les parties métalliques de l'isolateur, en l'occurrence le capôt et la tige, sont le siège aux équipotentielles, représentant les régions à potentiel fixe. La tension appliquée affecte uniquement les valeurs du potentiel et du champ électriques, mais pas leurs formes.

Dans le cas de chaînes moignons (éclatement d'un ou deux éléments), les éléments restants subissent tout le niveau de tension. Ce qui augmente le champ électrique. La ligne peut être mise en danger si le champ dépasse le seuil accepté (500 kV/m).

Les valeurs du potentiel et du champ électriques diminuent au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'axe principal de l'isolateur. La valeur maximale du champ électrique est obtenue à proximité des nervures de l'isolateur.

Conclusion Générale

Notre présente étude nous a permis, dans un premier temps, d'acquérir des connaissances sur les phénomènes de conduction et de décharges électriques sur les surfaces isolantes contaminées, et de contribuer, par la suite, à l'étude du comportement des isolateurs pollués, en vue de prédéterminer leur tenue au contournement, afin d'éviter les coupures de l'alimentation en électricité. Afin, de bien mener ce travail, nous avons jugé nécessaire de le développer suivant deux parties distinctes :

- Une partie expérimentale permettant l'étude des performances des isolateurs 1512L et 175 CTV sous tension alternative 50Hz.
- Une partie de simulation permettant la détermination des distributions du potentiel et du champ électriques le long de la chaîne d'isolateurs 175 CTV.

Dans la première partie, des essais diélectriques ont été effectués au laboratoire de Haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique, sur deux types d'isolateurs : le 1512L et le 175 CTV artificiellement pollués. Ces essais nous ont permis de mettre en évidence l'influence de la pollution sur le comportement de ces isolateurs.

Pour cela, nous avons suivi les variations de la tension de contournement, du courant de fuite, de la charge, de l'impédance et la capacité équivalentes et finalement de l'énergie, en fonction de divers paramètres tels que : la tension appliquée, la conductivité de la couche polluante, le nombre d'éléments dans une chaîne et le profil de l'isolateur utilisé.

L'étude de la tension de contournement en fonction de la conductivité révèle que l'isolateur perd sa rigidité diélectrique au fur et à mesure que la conductivité volumique du milieu augmente, et cela pour les deux types d'isolateurs. Pour une même conductivité de la couche polluante, une chaîne qui contient le plus d'éléments est la plus rigide. En effet, la tension de contournement augmente avec le nombre d'éléments. La tension de contournement est plus importante dans le cas d'une chaîne d'isolateurs 1512L. Par voie de conséquence, l'isolateur 1512L est plus rigide que le 175 CTV. Nous avons aussi conclu que, pour les couches de pollution de grandes conductivités, l'arc de décharge adopte un trajet préférentiel le long de la ligne de fuite. En revanche, une faible conductivité de la couche polluante favorise le claquage dans l'air entre les jupes.

Il ressort de l'étude du courant de fuite que, l'amplitude de ce dernier croît avec l'augmentation de la tension appliquée et de la conductivité de la pollution. L'augmentation de la conductivité a pour effet la diminution de l'impédance électrique équivalente du système. Cette diminution est très rapide pour les conductivités comprises entre 0 et

210 μ S/cm et faible ailleurs, en tendant vers une valeur finie. Il est évident que la capacité équivalente du système est inversement proportionnelle à la valeur de l'impédance électrique équivalente, ce qui explique le fait d'avoir une allure décroissante de cette capacité équivalente en fonction de la conductivité. Ceci justifie également l'allure du graphe du courant de fuite en fonction de la conductivité vu la relation inversement proportionnelle qui relie le courant de fuite et l'impédance équivalente d'une part, et la relation de proportionnalité existant entre le courant de fuite et la capacité du système isolant, d'autre part. L'augmentation du nombre d'éléments employés dans une chaîne a pour conséquence la diminution du courant de fuite. Le courant de fuite obtenu dans le cas d'une chaîne d'isolateurs 1512L est relativement élevé par rapport à celui prélevée pour le cas d'une chaîne d'isolateurs 175 CTV, quel que soit le nombre d'éléments utilisés.

La charge possède un comportement identique à celui du courant de fuite du point de vue de la variation en fonction de la tension appliquée et de la conductivité. En effet, la valeur de la charge croît avec l'augmentation de la tension appliquée et de la conductivité de la pollution. D'autre part, la charge décroît en augmentant le nombre d'éléments (1512L ou 175 CTV) dans une chaîne pour les deux types d'isolateurs. Les valeurs de la charge obtenues pour l'isolateur 1512L sont supérieures à celles obtenues dans le cas de l'isolateur 175 CTV, et ce, quel que soit le nombre d'isolateurs. L'étude de l'énergie du système a montré qu'elle suit la charge dans sa variation par rapport à la tension appliquée et à la conductivité. Cependant, elle croît très rapidement, par rapport à la charge, avec l'augmentation de ces dernières.

La deuxième partie de notre travail a porté sur l'étude de la distribution du potentiel et du champ électriques le long de la chaîne d'isolateurs 175 CTV. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Mutliphysics, basé sur la méthode des éléments finis. Cette étude nous a permis de conclure que c'est l'état de surface qui influe sur la répartition du champ électrique et non pas la conductivité de la pollution. La valeur maximale du champ est obtenue dans le cas où la chaîne est polluée. Par contre, l'effet de l'état de surface et de la conductivité de la pollution est très négligeable sur la répartition du potentiel. Ce dernier reste presque fixe, même avec des conductivités très élevées.

La répartition du potentiel est pratiquement équitable puisque tous les éléments, dans une chaîne d'isolateurs, recevront une différence de potentiel très proche. Par ailleurs, les parties près du conducteur sont les plus exposées aux contraintes électriques, à savoir, la différence

de potentiel et le champ électrique. Les parties métalliques de l'isolateur, en l'occurrence, le capôt et la tige, sont des équipotentielles où la valeur du potentiel est toujours fixe.

Le champ électrique augmente avec la tension appliquée. Cependant, la forme du champ et du potentiel électriques restent les mêmes. En d'autres termes, la différence est dans les valeurs et non pas dans la forme.

Les valeurs du potentiel et du champ électriques diminuent au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'axe principal de l'isolateur. La valeur maximale du champ électrique est obtenue dans les nervures de l'isolateur près de la tige. Dans le cas de l'éclatement (cassure) d'un élément voire deux, l'élément (ou les éléments) restant reçoivent tout le niveau de tension. Ceci a pour effet d'augmenter le champ électrique. Si ce dernier dépasse le seuil accepté de 500 kV/m, il mettra, sans doute, la ligne en danger ; ce cas de figure doit être évité.

Bibliographie

- [1] **J. Y. Saison**, « Etude du phénomène d'humidification des dépôts naturels et artificiels de pollution sur des isolateurs électriques », Thèse de Doctorat Es Sciences, Université de Strasbourg, France, 1992.
- [2] **M. Tegar, A. Boubakeur**, « Pollution des Isolateurs de Haute Tension », cours de graduation, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2004.
- [3] **M. Terkmani, M. Babouameur**, « Contournement des Isolateurs des Lignes de Haute Tension », Projet de Fin d'Etudes, Département d'électrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Juin 2005.
- [4] **L. Arrabi**, « Visualisation et Traitement de Signal de Courant de Fuite sur une Surface Isolante Polluée », Projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Juin 1999.
- [5] **M. Tegar**, « Modélisation d'Isolateurs Pollués Soumis a Divers Paramètres Electrogéométriques », Thèses de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Avril 2004.
- [6] **M. A. R. M. Fernando and S. M. Gubanski**, « Leakage Current Patterns on Contaminated Polymeric Surfaces », IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation Vol. 6, No. 5, October 1999.
- [7] **S. Lotfi, S. Djafri**, « Contribution à l'Etude de la Pollution des Isolateurs des Lignes Ariennes de Haute Tension dans la Région de l'Arbaa », Projet de Fin d'Etudes, Département d'Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Juin 1982.
- [8] **S. Guerfi**, « Modélisation des isolateurs de haute tension pollués sous tension continue », Mémoire de Magister, Génie Electrique, Université Abderahmane Mira, Bejaia.
- [9] **M. Soufi, M. Zemirline**, « Conception d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz », Projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2004.

- [10] **K. Amriche, S. Benayad**, « Modélisation des principales caractéristiques d'un isolateur pollué sous tension continue », Projet de Fin d'Etudes, Département d'Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Juin 2004.
- [11] **W. Heise, G. Fluxa, G. Revrery, M. P. Verma**, « Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide », CIGRE, Rapport 33-09, Paris. France, 1982.
- [12] **M. Tegar**, « Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Juillet 1993.
- [13] **P. J. Lambeth, H. Auxel, M. P. Verma**, « Méthode de mesure de la sévérité de la pollution compte tenu de son influence sur le comportement des isolateurs à haute tension », Electra N°. 20, pp 95-100, Janvier 1972.
- [14] **S. Bouazabia, T. Chikhaoui**, « Méthodes d'essais sur des isolateurs pollués dans les conditions désertiques », Projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Juin 1988.
- [15] **A. Mekhaldi**, « Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharges Electrique sur les Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternative à 50 Hz », Thèse de Doctorat d'Etat, Département d'électrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Décembre 1999.
- [16] **Z. Sahli**, « Etude de la Non Uniformité de la Pollution sur des Caractéristiques de Contournement des Isolateurs Réels Pollués Sous Tension Continue », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2005.
- [17] **A. Mekhaldi**, « Etude du Développement d'un Arc Electrique sur des Surfaces Isolantes Contaminées par la Pollution Désertique », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Juin 1990.
- [18] **B. A. Mhamdi**, « Modélisation d'un Isolateur Naturellement Pollué Sous Tension Impulsionnelle Utilisant des Circuits Electriques Equivalents », Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Décembre 2008.

[19] **A. K. Munjundar, N. Vasudev, K. N. Ravishannakeshava**, « Pollution Test Method of Insulator Under DC Voltage Using Dust Chamber », Ninth International Symposium of High Voltage Engineering, Graz, Autriche, 28 Août- 1 Septembre 1995.

[20] **F. Amidi, K. Ouerdane**, « Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30kV en régions littorales », Projet de Fin d'Etude, Département d'Electrotechnique, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Alger, Juin 1998.

[21] **Le Roy, Cie**, «Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions», Collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, Paris, 1984.

[22] **R. Matsuoka, S. Ito, K. Sakanishi, K. Naito**, « Flashover on Contaminated Insulators with Different Diameters», IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 26 No. 6, pp. 1140 – 1146, Décembre 1991.

[23] **F. F. Bologna, A. C. Britten, N. Mahatho, J. P Reynders**, « Light Pollution and light wetting on Ceramic (Glass) Insulators as a Cause of Unknown Flashover on Transmission Lines », pp. 4-6, South African High Voltage Engineering Center (SAHVEC) TSI, ESKOM Enterprises, South Africa, 2001.

[24] **Commission Électrotechnique Internationale**, « Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés aux réseaux à courant alternatif » Norme Internationale CEI 507, Avril 1991.

[25] **F. Meghnefi, C. Volat, M. Farzaneh**, « Temporal and Frequency Analysis of the leakage Current of a Station Post Insulator during Ice Accretion », IEEE Trans. Vol. 14, No. 5, pp.1381-1389, Décembre 2007.

[26] **J. Keller-Jacobsen, A. Pedersen, J. K. Rasmussen, A. Henriksen, C. Lindqvist, S. Smedsfelt**, « Essais au laboratoire et en plein air pour dimensionner correctement les isolateurs exposés à la pollution saline », CIGRE, Rapport 33-11, 1978

[27] **D. A. Swift**, « AC disc insulators: accumulation of pollution within and around the pin cavity », 7th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 44-22, pp. 26-30, Août 1991, Dresde, Allemagne.

[28] **M. El-Koshairy, E. El-Sharkawi, M. M. Awad, H. Zarzoura, M. Khalifa, A. Nosseir**, « Performances de chaînes d'isolateurs haute tension soumises à la pollution du désert », CIGRE, Rapport 33-09, 1982.

[29] **M. Awad, M. Said, A. Arafa, A. Sadeek**, « Effect of sandstorms with charged particles on the flashover and breakdown of transmission lines », CIGRE, Rapport 15-306, 2002, Paris, France.

[30] **Y. Zhu, K. Haji, H. Yamamoto, T. Miyake, M. Otsubo, C. Honda**, « Distribution of Leakage Current on Polluted Polymer Insulator Surface », Annual Report for Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.397-400, 15-18 October 2006, Kansas city, USA.

[31] **M. Otsubo, T. Hashiguchi, C. Honda, O. Takenouchi, T. Sakoda, Y. Hashimoto**, «Evaluation of insulation performance of polymeric surface using a novel separation technique of leakage current », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 10, pp. 1053-1060, December 2003.

[32] **A. Metwally, M. Abdus Salam, A. Al-Maqrashi, S. Sumry, S. Al-Harthy**, «Electrostatic and Electrodynamic Field Analyses of 33kV Line Insulators», International Journal of Emerging Electric Power Systems, volume 7, article 3, September 2006, Oman.

[33] **S. Brettschneiders**, « Effects of Atmospheric Ice on the Maximum Withstand Voltage of High Voltage Insulators », Thèse de Doctorat, Université de Karlsruhe, Allemagne, Décembre 1996.

[34] **S. Kaana-Nkusi, P. H. Alexander, and R. Hackam**, « Potential and Electric Field Distributions at a High Voltage Insulator Shed» IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, No. 2, pp. 307-318, April 1988.

[35] **R. Hartings**, «Modern Experimental Techniques to Study the Discharge Phenomena on Outdoor Insulators», Proceedings of the Seventh International Symposium on High Voltage Engineering, Dresden, Paper No. 72.100. August 1991.

[36] **A. Eklund, R. Hartings**, «Electric Field Measurements on Composite and Ceramic Insulators During Pollution Testing » Proceedings of CIRED 97, June 1997, IEE Conference Publication No. 438, pp. 32-35, June 1997, Birmingham, UK.

[37] **T. Zhao, and M. G. Comber**, « Calculation of Electric Field and Potential Distribution along Non-Ceramic Insulators Considering the Effects of Conductors and Transmission Towers», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, pp. 313-318, January 2000.

[38] **S. Chakravorti, and P. K. Mukherjee**, « Power Frequency and Impulse Field Calculation Around a HV Insulator with Uniform or Non-uniform Surface Pollution », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 28, No. 1, pp. 43-53, February 1993.

[39] **H. El-Kishky, and R. S. Gorur**, « Electric Potential and Field Computation Along AC HV Insulators », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No. 6, pp. 982-990, December 1994.

[40] **C. Volât**, « Modélisation physique et numérique par la méthode des éléments finis de frontière de la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur standard de poste 735 kV recouvert de glace », Thèse de Doctorat en Ingénierie, Département de Génie Electrique, Université du Québec à Chicoutimi, Juin 2002.

[41] **Z. Aydogmus, M. Cebeci**, «A New Flashover Dynamic Model of Polluted HV Insulators», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation DEI, Vol. 11, No. 4, pp. 577-584, Aout 2004.

[42] **M. D. R. Beasley, J. H. Pickles, L. Beretta, G. d'Amico, M. Fanelli, G. Giuseppetti, M. Morin, J. P. Grégoire, G. Gallet**, « Etude comparative de trois méthodes de calcul automatique du champ électrostatique », RGE, Tome 88, Vol. 1, pp.7-18, Janvier 1979.

- [43] **G. Chavent**, « Méthodes aux différences finies », Technique de l'ingénieur, A550, 1993.
- [44] **K. J. Binns, P. J. Lawrenson**, « Analysis and computation of electric and magnetic field problems », Pergamon Press Ltd, 1973.
- [45] **E. Asenjoe, N. Morales**, « Low Frequency Complex Fields In Polluted Insulators », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. El-17, No. 3, pp. 262-267, Juin 1982.
- [46] **G. Dhatt, G. Touzot**, « Une présentation de la méthode des éléments finis » Maloine S. A. Editeur, Paris, 1984.
- [47] **N. Fujimoto, J. M. Braun**, « Critical Fields in Composite Insulators Effect of Voids and contaminants », 9th International Symposium on High-Voltage engineering, pp. 8845-1 à 8845-4, Septembre 1995. Graz, Autriche.
- [48] **H. Singer, H. Steinbigler, P. Weiss**, « A charge simulation method for the calculation of high voltage field », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Pass 93, pp.1660-1668, Septembre-Octobre 1974.
- [49] **M. J. Khan, P. H. Alexander**, « Charge Simulation Modeling of Practical Insulator Geometries », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. El-17, no. 4, pp. 325-332, Août 1982.
- [50] **T. Misaki, H. Tsuboi**, « Computation of 3-Dimensional Eddy Current Problems by Using Boundary Element Method », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. MAG-21, No. 6, pp. 2227-2230, Novembre 1985.
- [51] **A. Skopec, J. G. Wankowicz et B. Sikorski**, « Electric Field Calculation for an Axiallysymmetric Insulator with Surface Contamination », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No.2, pp. 332-339, Avril 1994.

[52] **T. H. Fawzi, Y. A. Safar**, « Boundary Methods for the Analysis and Design of High-Voltage Insulators », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol 60, issue 3, pp. 134-369, February 1987.

[53] **J. Daffe, R. G. Olsen**, « An integral equation method for solving rotationally symmetric electrostatic problems in conducting and dielectric material », *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol 98, pp. 1609-1616, Septembre-Octobre 1979.

[54] **C. A Brebbia, J. Telles et L. Wrobel**, « Boundary Element Techniques », Springer, Berlin, 1984.